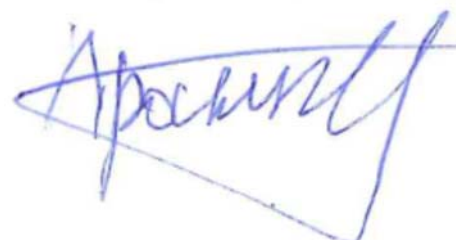


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ПРАНКЕВИЧ ГЛЕБ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ
ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ КАК
ЭЛЕМЕНТА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

Специальность 05.14.02 — Электрические станции и электроэнергетические
системы

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Зырянов Вячеслав Михайлович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Новосибирск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ	13
1.1 НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ	13
1.2 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭ	18
1.3 МИРОВОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭ	25
1.3.1 МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭ	25
1.3.2 ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭ	28
Выводы по главе 1	31
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЭ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	32
2.1 ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАСЧЁТОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СНЭ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ. 32	
2.2 ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СНЭ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ	41
2.3 СТРУКТУРЫ СНЭ НА БАЗЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ, ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	42
2.4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ РАСЧЁТА РЕЖИМОВ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ	51
2.4.1 БЛОК «ПАРАМЕТРЫ СНЭ»	55
2.4.2 БЛОК «ОГРАНИЧЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО И МАКСИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ЗАРЯДА СНЭ»...	59
2.4.3 БЛОК «ОГРАНИЧЕНИЕ ПО РАСПОЛАГАЕМОЙ МОЩНОСТИ ПОДСИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ СНЭ»	60
2.4.4 БЛОК «РАСЧЕТ УРОВНЯ ЗАРЯДА СНЭ»	62
2.4.5 ОГРАНИЧЕНИЯ ПОДСИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СНЭ.....	66

2.4.6	МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ СНЭ.....	70
2.5	ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СНЭ.....	71
2.5.1	СНЭ НА БАЗЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ.....	73
2.5.2	СНЭ НА БАЗЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ.....	76
2.5.3	СНЭ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО (МАХОВИКОВОГО) НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ....	78
	Выводы по главе 2.....	82
	ГЛАВА 3 ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ.....	83
3.1	СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РАСЧЁТОВ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	87
3.1.1	КОНТРОЛЬНЫЙ ОПЫТ (БЕЗ СНЭ).....	87
3.1.2	ОПЫТ ОГРАНИЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ И МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДИЗЕЛЬ- ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ СНЭ.....	90
3.1.3	ОПЫТ ОГРАНИЧЕНИЯ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ СНЭ.....	93
	Выводы по главе 3.....	97
	ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ЭНЕРГООБЪЕКТА ДЛЯ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ СНЭ.....	98
4.1	ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ.....	98
4.1.1	РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ.....	99
4.1.2	РАСЧЕТ МОЩНОСТИ.....	99
4.1.3	ПРИМЕР ОБРАБОТКИ ОСЦИЛЛОГРАММ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ.....	103
4.2	ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ АНАЛИЗА НАГРУЗОЧНЫХ ДИАГРАММ.....	106
	Выводы по главе 4.....	109

ГЛАВА 5 МЕТОДИКА ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ.....	110
5.1 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ КАК ЭЛЕМЕНТА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ОБЗОР МЕТОДИК ИХ РАСЧЕТА	110
5.2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МОЩНОСТИ И ОБМЕННОЙ ЭНЕРГОЁМКОСТИ СНЭ ..	116
5.2.1 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ СНЭ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА.....	116
5.2.2 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ НЧК В УЗЛАХ НАГРУЗКИ С РЕЗКО ПЕРЕМЕННЫМ ХАРАКТЕРОМ ПОТРЕБЛЕНИЯ	121
5.2.3 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ СНЭ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ЗАДАННОМ АЛГОРИТМЕ УПРАВЛЕНИЯ.....	125
5.2.4 ПРОЦЕДУРА ВЫБОРА МОЩНОСТИ И ОБМЕННОЙ ЭНЕРГОЁМКОСТИ СНЭ	128
5.3 РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ СНЭ.....	130
5.3.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ МОЩНОСТИ СНЭ	131
5.3.2 РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ, ТРЕБУЕМОЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЯВЛЕННЫХ ФУНКЦИЙ И СРОКА СЛУЖБЫ СНЭ	132
5.3.3 ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ СНЭ	134
Выводы по главе 5	135
ГЛАВА 6 ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТОК АВТОРА ДИССЕРТАЦИИ В ПРАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОИЗВОДСВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	136
6.1 НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СНЭ В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ.....	136
6.1.1 НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СНЭ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	136
6.1.2 НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СНЭ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	139

6.1.3	ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ	142
6.2	ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИК В ПРАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	142
	Выводы по главе 6	143
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	148
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	150
	ПРИЛОЖЕНИЕ «А» ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ	157
	ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	158

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Активизация интереса к современным быстродействующим системам накопления энергии (СНЭ) в отечественной научной среде и промышленности началась в конце 60-х начале 70-х годов XX века, практически одновременно с другими передовыми странами мира. Но в связи с тяжелым экономическим положением страны в конце 80-х и в 90-ые годы многие научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области СНЭ были свернуты и прекращены. Экономическая ситуация в стране, а также резкий, скачкообразный переход от плановой экономики к рыночной не позволяли развивать направления науки и производства, которые не приносили быстрого роста экономических показателей. Тематика и рынок СНЭ относились именно к таким направлениям. Поэтому работы по накопителям энергии в нашей стране в это время были заторможены.

За последние десятилетия технологии накопления энергии получили значительное развитие, существенно снизились стоимости компонентов СНЭ (аккумуляторы, силовые преобразователи), что в свою очередь повысило рентабельность проектов с применением СНЭ. Возросшие экономические показатели СНЭ резко увеличили интерес к данной тематике, в том числе и в РФ. Но всё же за последние два десятилетия отставание нашей страны от общемирового уровня в практическом применении систем накопления энергии только усугублялось. В теоретических разработках это отставание не было так ярко выражено, благодаря работам научных школ МЭИ, СибНИИЭ, НГТУ и др. Значительный вклад в развитие научного направления по применению накопителей энергии внесли такие российские учёные и специалисты, как: Астахов Ю.Н., Гулиа Н. В., Тер-Газарян А.Г., Бердников Р.Н., Н.Л. Новиков, Харитонов С. А., Смоленцев Н.И., Зырянов В.М., Смоленцев Д.О., Илюшин П.В., Глушкин И.З., Якимец И.В., Кузнецов О.Н. и др.

Зарубежные разработки в тематике СНЭ представлены большим количеством публикаций. Вопросам применения СНЭ в электроэнергетических системах посвящены работы авторов: Boom R.W., Rogers J.D., Hassenzahl W.V.,

Masuda M., Shintomi T., Sato N., Robyns, B., François, B., Delille, G., Saudemont C, N.Shi, Dulout J., Amjad Anvari-Moghaddam, Adriana Luna, Bruno Jammes, Corinne Alonso, Sioshansi R. Madaeni, S.H. Denholm, Fossati J.P., M. Rampazzo, M. Luvisotto, N. Tomasone, I. Fastelli, M. Schiavetti и др.

Темпы развития и внедрения СНЭ в РФ несопоставимы с мировыми, но в последние годы динамика развития приобрела явно выраженную позитивную тенденцию. Министерством энергетики РФ опубликована концепция развития рынка систем хранения энергии в РФ [1], в которой освоение и внедрение СНЭ в практику электроэнергетики определено, как одно из ключевых направлений развития отрасли на ближайшую перспективу.

Современные быстродействующие СНЭ являются принципиально новыми энергетическими силовыми устройствами, предназначенными для управляемого энергообмена с энергосистемой с целью организации желаемого режима или для управления динамическими процессами.

Достаточно широко распространено мнение, согласно которому роль СНЭ в энергосистеме сводится лишь к роли источника бесперебойного питания. Но в действительности – это лишь одна (причём, далеко не основная) из функций, которые способна выполнять СНЭ. Накапливая энергию при её избытке в энергосистеме, сохраняя в течение достаточно длительного времени с приемлемым уровнем потерь и возвращая в нужный момент в энергосистему, СНЭ способна, практически безынерционно управлять балансом активной мощности по любому заданному алгоритму, в соответствии с решаемой задачей. Кроме этого СНЭ может быть использована для компенсации реактивной мощности, в качестве активного фильтра высших гармоник и как средство компенсации несимметрии в трёхфазных сетях. Учитывая многофункциональность и быстродействие систем накопления, можно рассчитывать, что при широком внедрении в электроэнергетику и при достижении значений мощности и энергоёмкости систем накопления, актуальных для ЕЭС, многие задачи регулирования и управления, в том числе противоаварийного, могут решаться с помощью СНЭ.

Возможны различные сценарии применения СНЭ в объединённых, изолированных и автономных энергосистемах. К автономным энергосистемам целесообразно относить изолированные энергосистемы, если в составе их потребителей есть хотя бы один потребитель, имеющий номинальную мощность, соизмеримую с мощностью всего генерирующего оборудования. Коммутации таких потребителей и изменения их режима работы способны приводить к глубоким, нередко критическим, колебаниям режимных параметров энергосистемы даже в нормальных технологических условиях эксплуатации. Примерами таких энергосистем могут служить автономные системы электроснабжения промышленных предприятий, объектов строительства, нефтегазовой отрасли, судовых энергосистем и многих других объектов, имеющих собственные электростанции.

В силу новизны технологий СНЭ их освоение и внедрение в практику российской электроэнергетики начинается с относительно малых мощностей и энергоёмкостей. В настоящее время в РФ реализуется ряд проектов со СНЭ в автономных энергосистемах, которые характеризуются высокой экономической и технической эффективностью.

Позитивный опыт реализации вышеупомянутых проектов позволит приступить к более масштабным проектам по применению СНЭ, в том числе, на объектах ЕЭС России. Оценка их эффективности и целесообразности применения в ЕЭС и в высоковольтных изолированных энергосистемах требует детальной проработки в каждом рассматриваемом случае при условии надёжности и экономической доступности технологий.

СНЭ принципиально новый многофункциональный элемент энергосистемы. Внедрение накопителей в состав энергосистемы придаёт ей новые свойства и характеристики, влияет на её схемно-режимные параметры, способы и методы управления. Новизна и многофункциональность СНЭ обуславливают необходимость разработки методик выбора её параметров и математических моделей. Для исследования работы СНЭ в составе энергосистемы, для расчётов нормальных, переходных и аварийных режимов, электромагнитных и

электромеханических переходных процессов необходимы соответствующие математические модели разной степени идеализации и детализации. Имеющиеся в настоящее время математические модели СНЭ в составе промышленных вычислительных комплексов далеко не в полной мере удовлетворяют потребности специалистов.

Цель диссертационной работы – разработка математической модели и методики выбора основных параметров системы накопления электроэнергии.

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

1. Формулирование требований к математической модели СНЭ для расчета электромеханических переходных процессов.
2. Разработка математической модели СНЭ, как элемента электроэнергетической системы.
3. Верификация разработанной математической модели.
4. Апробация математической модели при исследовании эффективности СНЭ для целей управления электромеханическими процессами в энергосистеме.
5. Разработка технологии обработки результатов мониторинга электроэнергетического объекта для выбора параметров СНЭ.
6. Разработка и апробация методики выбора и расчёта параметров СНЭ для актуальных функциональных назначений на основе результатов мониторинга.
7. Проведение натурных испытаний СНЭ в динамических режимах.

Объект исследования – система накопления энергии в составе электроэнергетической системы.

Предмет исследования – математическая модель и методики выбора основных параметров СНЭ.

Научная новизна диссертации:

1. Предложен новый способ моделирования СНЭ, позволяющий рассчитывать переходные электромеханические процессы с учётом динамики энергообмена для различных типов подсистем накопления энергии.

2. Разработана математическая модель СНЭ совместимая с основными промышленными вычислительными комплексами, для расчёта переходных электромеханических процессов в энергосистемах с накопителями энергии.

3. Разработана методика выбора основных параметров СНЭ на основе анализа амплитудно-частотных характеристик графиков нагрузки для задач демпфирования колебаний мощности нагрузки заданной частоты.

4. Разработана методика выбора основных параметров СНЭ на основе анализа результатов расчета переходного процесса с заданным алгоритмом управления.

Практическая значимость:

1. Разработан способ построения математической модели СНЭ (получен патент РФ RU 2736701 C1).

2. Модель СНЭ реализована в ППК Matlab Simulink и DigSilent PowerFactory, позволяет проводить полноценные научные и научно-производственные исследования, расчёты режимов и переходных процессов в энергосистемах со СНЭ.

3. Наиболее актуально применение математической модели для разработки алгоритмов управления СНЭ и расчете её основных параметров в составе энергосистем.

Методология и методы исследования

Для исследования характеристик и особенностей работы СНЭ в составе энергосистем использованы методы математического (ПК Matlab, PowerFactory) моделирования и натурные эксперименты.

В диссертационной работе использовались: теория автоматического управления, теория имитационного моделирования, теория обработки сигналов, теория непрерывного и быстрого преобразования Фурье, теория мгновенной мощности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ моделирования, учитывающий взаимосвязь уровня заряда и располагаемой мощности, обеспечивает единство расчета переходных процессов в энергосистеме и в СНЭ.
2. Методика выбора основных параметров СНЭ на основе мониторинга режимных параметров электроэнергетического объекта и анализа АЧХ его графика нагрузки позволяет оптимизировать мощность и энергоёмкость накопителя при решении задач подавления нежелательных колебаний мощности при резкопеременном характере нагрузки.
3. Методика выбора основных параметров СНЭ по результатам расчёта переходного процесса по разработанной модели даёт минимально необходимые значения мощности и энергоёмкости для реализации заданного алгоритма управления накопителем энергии.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов подтверждена натурными экспериментами СНЭ в составе электроэнергетической системы и расчётами с использованием промышленных ПВК.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), городской научно-практической конференции «Aspire to Science» в 2016 году в г. Новосибирске, на международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017» в 2017 году в г. Самара, всероссийской научно-технической конференции «Электропитание-2018» в 2018 году в г. Новосибирске, четырнадцатой международной научно-технической конференцией "Актуальные проблемы электронного приборостроения" в 2018 году в г. Новосибирске.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 28 печатных научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях согласно перечню российских рецензируемых научных

журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ), 9 публикаций, индексируемых в наукометрических базах данных Scopus и Web of Science, 15 публикаций в сборниках материалов и трудов научных конференций, форумов всероссийского и международного уровня. Получен 1 патент на изобретение. Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждено актами внедрения.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 62 наименования, и двух приложений. Общий объем работы составляет 159 страниц, включает 60 рисунков и 10 таблиц.

ГЛАВА 1 НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1 Применение накопителей энергии в электроэнергетике

Производство электроэнергии принципиально отличается от любого другого производственного процесса. Принципиальная разница заключается в том, что в настоящее время процессы производства, распределения и потребления электроэнергии в основном происходят одновременно. Разделить их во времени в промышленных масштабах до недавнего времени не позволял уровень развития технологий хранения энергии (за исключением гидроаккумулирующих электростанций).

Значительная неравномерность нагрузки, наличие пиков и резких падений уровня потребления энергии создают технические проблемы для производителей энергии, связанные с необходимостью обеспечения согласованности производства и потребления электроэнергии – поддержания баланса генерируемой и потребляемой мощности.

Обеспечивая баланс мощности, необходимо учитывать и то обстоятельство, что основное силовое оборудование электростанций имеет наилучший КПД и удельный расход топлива при загрузке в диапазоне 70 – 80 % от номинальной мощности. При выходе из этого диапазона технико-экономические характеристики оборудования снижаются, удельный расход топлива увеличивается.

В последние десятилетия значительно расширился сектор ВИЭ-генерации в мировой энергетике, быстро развивается распределённая генерация, что значительно обостряет проблему поддержания баланса активной мощности. Для её решения можно использовать следующие методы управления:

1. «согласование» во времени процессов производства и потребления электрической энергии, за счёт изменения генерируемой или потребляемой мощности;

2. накопление излишков энергии в накопителях энергии в период минимального потребления (в провале графика нагрузки) и ее выдача в период максимального потребления.

Первый метод является основным и связан с необходимостью иметь значительный резерв генерирующей мощности и с усложнением работы энергетических предприятий, что ухудшает технико-экономические показатели производителей электроэнергии и приводит к увеличению стоимости электроэнергии. Привлекаются при этом к регулированию и потребители путём введения многоставочных тарифов на электроэнергию, повышения цены на потребляемую мощность в пиковые часы энергосистемы и т. д. Всё это стимулирует потребителя изменить свой график нагрузки, для снижения затрат на покупку электроэнергии и мощности.

Второй метод эффективно дополняет первый и в последние десятилетия все шире используется в мировой практике.

Способность накопителей энергии разделять во времени процессы производства и потребления электроэнергии является предпосылкой к значительным преобразованиям в структуре и организации функционирования энергосистем, повышающим их надёжность и эффективность. Накопление энергии в специализированных устройствах становится одним из ключевых направлений развития энергетики, открывающим новый этап её развития.

До недавнего времени единственной технологией хранения энергии, получившей широкое практическое применение в электроэнергетике, была технология гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), реализованная ещё в 19 веке.

В последние десятилетия технологии накопления энергии вышли на качественно новый уровень. Создаваемые на основе передовых технологий системы накопления электрической энергии (СНЭ) уже сегодня являются актуальными и востребованными в электроэнергетике. Применение СНЭ открывает новые возможности для повышения качества управления

установившимися и переходными режимами и улучшает экономические показатели функционирования электроэнергетических систем.

По виду запасаемой энергии принято выделять следующие основные типы накопителей:

- Механические накопители (гравитационные и кинетические). ГАЭС является наиболее известным видом накопителя электроэнергии такого типа. Суммарная установленная мощность ГАЭС в мире в настоящее время составляет около 165 ГВт. Доля ГАЭС в суммарной установленной мощности накопителей в энергосистемах мира на сегодняшний день составляет 97% [2].

В кинетических накопителях энергия запасается в процессе движения рабочего тела (маховиковые, электромеханические накопители). Накопление энергии производится с помощью маховиков, вращающихся с высокой скоростью. Маховики соединяются с мотор-генератором, конвертирующем энергию вращающейся массы в электрическую и обратно.

- Тепловые накопители. Энергия накапливается и выдается при изменении тепловой энергии (при нагревании, остывании или изменении фазового состояния) рабочего тела.

- Электрохимические накопители. К данному типу накопителей относятся, прежде всего, аккумуляторные батареи. Наиболее известны свинцово-кислотные, никель-кадмиевые, литий-ионные, натрий-серные, бром-цинковые, ванадиевые проточные, никель-металлгидридные. Накопители на базе литий-ионных аккумуляторов получили наиболее широкое применение в электроэнергетических системах [3].

- Электромагнитные накопители. Различают электрические накопители, которые запасают энергию в электрическом поле (суперконденсаторы) и магнитные, запасующие энергию в магнитном поле сверхпроводниковых катушек индуктивности (СПИН).

- Воздухоаккумулирующие установки. В накопителях этого типа электроэнергия запасается в виде потенциальной энергии сжатого воздуха, который используется для последующей выработки электроэнергии.

На рисунке 1.1 показана степень освоения различных технологий накопления энергии в РФ [4].

Среди наиболее востребованных и актуальных быстродействующих накопителей энергии следует выделить: аккумуляторы большой мощности (АБМ), суперконденсаторы, электромеханические (ЭМН) и СПИН. Все они обладают уникальными динамическими характеристиками, позволяющими организовать управляемый энергообмен с энергосистемой. В настоящее время наиболее интенсивно развиваются накопители с АБМ, а также гибридные накопители, в которых одновременно применяются АБМ и суперконденсаторы.

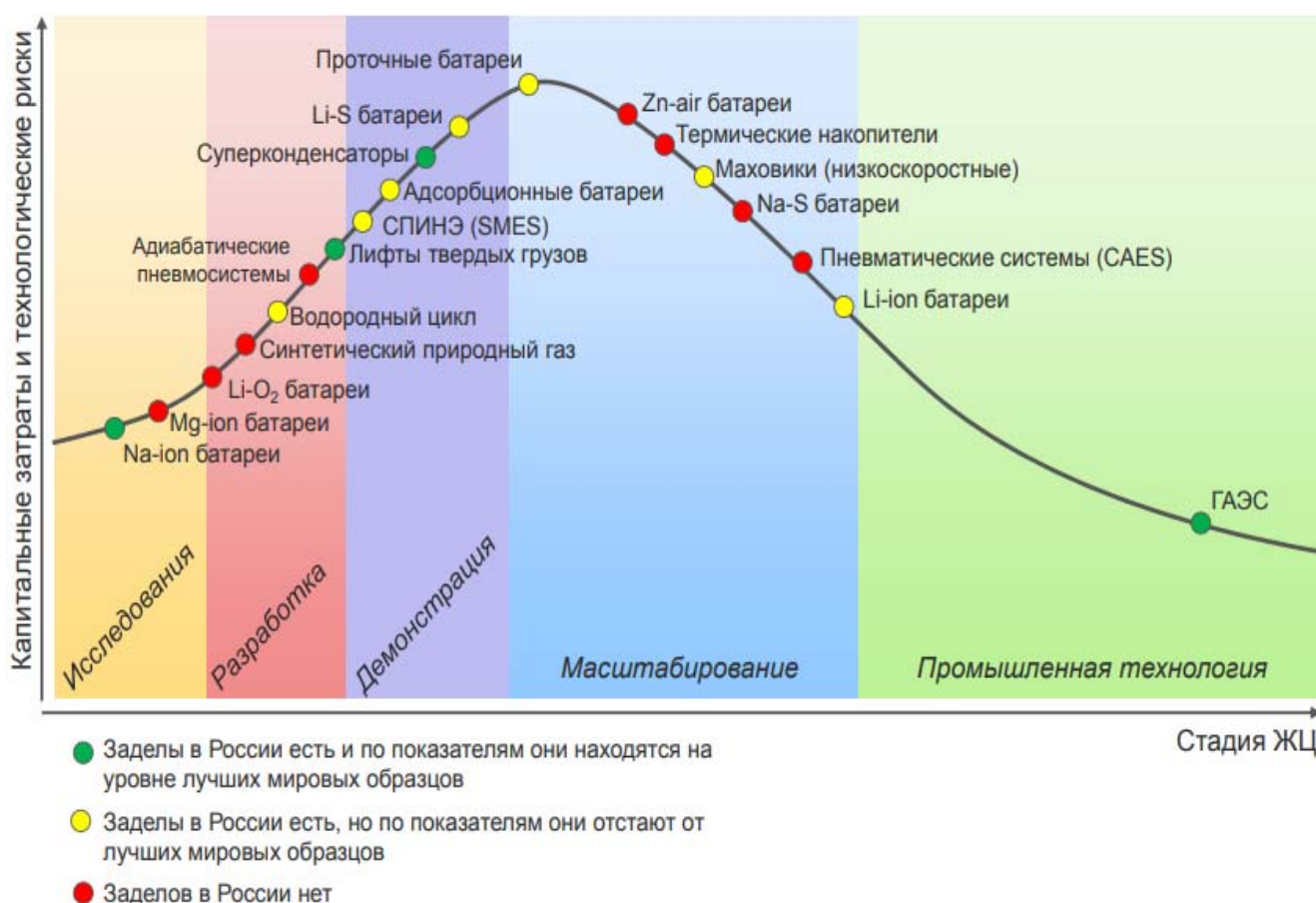


Рисунок 1.1 – Освоение технологий накопления энергии

Несмотря на то, что физические принципы, используемые в СНЭ, в основном были давно известны, их практическое использование сдерживалось несовершенством технологий и их дороговизной. СНЭ с относительно большими мощностями (более 100 кВт) и энергоёмкостью (более 100 кВт·ч) получили широкое распространение и начали активно влиять на процессы реформирования

электроэнергетики только в последние десятилетия в связи с прорывными научными достижениями в технологиях хранения энергии. Установленная мощность стационарных СНЭ (без учета ГАЭС) достигла в целом по миру к середине 2017 года 5 ГВт [4].

По оценкам Navigant Research, к 2025 году рынок систем накопления электроэнергии, используемых в сетевых и системных услугах, превысит 18 млрд долл., а рынок накопителей, установленных на коммерческих и промышленных объектах, – 10,8 млрд долл. [4].

К 2017 году рынок накопителей уже достиг 2,6 млрд долл. и к 2025 году суммарно составит 82 млрд долл. в год с ежегодными темпами роста до 60%. Из этой суммы до 50 млрд долл. в год будет приходиться на стационарные СНЭ, включённые в состав энергосистем [4].

Рынок накопителей электроэнергии для энергетики – один из самых перспективных рынков высоких технологий в мире, демонстрирующий экспоненциальные темпы роста. McKinsey Global Institute включил технологии накопления энергии в число 12 наиболее значимых для развития мировой экономики. По прогнозу Bloomberg New Energy Finance, за период 2016–2030 годов объем инвестиций в системы накопления электроэнергии превысит 100 млрд. долл. [4].

Основные стимулы развития рынка и практики применения СНЭ в мире:

1. Массовое распространение генерации на основе ВИЭ, эффективное масштабное применение которой невозможно без СНЭ.
2. Развитие и начало массового распространения городского и частного электрического транспорта.
3. Развитие распределённой генерации.
4. Массовое промышленное освоение литий-ионных АКБ, выступающих своего рода строительными блоками наиболее распространенных сегодня СНЭ, и резкое снижение их стоимости.

5. Прогресс технологий в силовой электронике и снижение себестоимости преобразователей, а также развитие систем коммуникаций, позволяющих координировать и управлять значительным количеством объектов в энергосистеме.

6. Рост потребности в пиковых генерирующих и сетевых мощностях (в том числе вследствие увеличения неравномерности бытового потребления в совокупном балансе электропотребления), приводящий к росту стоимости мощности для потребителей и к снижению эффективности работы энергосистем.

Всё перечисленное выше говорит о наступающем новом этапе в развитии электроэнергетики – широкомасштабном внедрении СНЭ в энергосистемы как принципиально нового элемента, благодаря которому

СНЭ многофункциональное устройство, способное одновременно выполнять функции управления активной и реактивной мощностью, активного фильтра высших гармоник, компенсации несимметрии напряжения в трёхфазных системах. Учитывая высокую стоимость СНЭ, целесообразно совмещать в одном устройстве одновременное выполнение разных функций.

1.2 Области применения СНЭ

В параграфе кратко рассмотрены некоторые из наиболее востребованных задач, которые могут быть решены с помощью СНЭ.

Повышение эффективности гибридных электростанций со СНЭ

В РФ, на территории не обслуживаемой Единой Энергосистемой, прежде всего, в Сибири и на Дальнем Востоке, эксплуатируется несколько тысяч автономных дизельных электростанций. На закупку и доставку топлива для этих электростанций затрачивается до 40% региональных бюджетов. При наличии достаточных объёмов возобновляемых ресурсов энергии целесообразно строить гибридные электростанции, в которых комбинируются ветрогенераторы, солнечные установки и традиционные дизель-генераторные агрегаты. Оснащение гибридных электростанций системами накопления энергии даёт возможность повысить их эффективность, так как появляется возможность оптимизировать

потоки энергии и при необходимости хранить её невостребованные объёмы, полученные при избытке возобновляемой генерации

Автоматическое регулирование частоты и перетоков активной мощности

Любое нарушение баланса активной мощности приводит к изменению частоты в энергосистеме, поддержание которой в нормируемых пределах при наличии резервов регулирования осуществляется автоматическими регуляторами частоты. Накопители энергии могут эффективно применяться в качестве вращающегося резерва, а также первичного и вторичного резерва регулирования частоты [5].

СНЭ, благодаря своему быстрдействию, могут привлекаться для первичного и вторичного регулирования частоты. Они способны эффективно по законам и алгоритмам, недоступным традиционным средствам регулирования частоты, обеспечивать баланс активной мощности, что коренным образом повышает качество регулирования частоты особенно при возникновении значительных небалансов активной мощности. Это особенно важно для энергосистем со значительной долей генерации на ВИЭ. В [6] показано, что 1 МВт быстродействующей СНЭ, привлекаемой к регулированию частоты, может заместить до 1,72 МВт резерва мощности ГЭС и до 27,5 МВт резерва мощности ТЭС.

Использование СНЭ для целей противоаварийного управления

Учитывая быстрдействие и многофункциональность, целесообразно использовать СНЭ в качестве средства противоаварийного управления [4]. При возникновении аварийной ситуации по сигналам от традиционной системы противоаварийной автоматики (ПА) СНЭ способна воздействовать на процессы в энергосистеме, выдавая или потребляя активную/реактивную мощность со временем отклика около 5 мс. При этом «штатная» ПА энергосистемы должна дублировать возложенные на СНЭ функции, в качестве резервной автоматики. В целом, система ПА становится более эффективной и надёжной за счёт дополнительных возможностей по влиянию на режимные параметры.

Предотвращение снижения напряжения и лавины напряжения

Изменение режима работы энергосистемы, нормальные технологические коммутации её элементов, аварийные события приводят к изменениям уровней напряжения в электрической сети. СНЭ, установленные в узлах нагрузки, способны в темпе переходных процессов поддерживать требуемый уровень напряжения и регулировать его по любому заданному закону. Это позволяет избежать отключения потребителей, снизить перетоки реактивной мощности по линиям электропередачи и понизить вероятность развития лавины напряжения.

Увеличение пропускной способности (по энергии) электропередач

Электроснабжение отдельных крупных потребителей электроэнергии или удалённых от объединённой энергосистемы промышленных районов зачастую осуществляется по линиям электропередачи, относящимся к слабым связям. Установка СНЭ на приёмном конце электропередачи, позволяет перераспределять передаваемую энергию во времени таким образом, чтобы сгладить график загрузки электропередачи и снизить пиковое значение мощности в центре питания. Таким образом становится возможным передавать большее количество энергии, не превышая максимально допустимое значение мощности электропередачи, что позволяет отсрочить строительство дополнительных линий.

Повышение надёжности электроснабжения потребителей особой группы

Для потребителей электроэнергии особой группы прерывание электроснабжения даже на время работы автоматики АВР может приводить к нарушению технологического процесса и значительному ущербу. Потребители особой группы обеспечиваются аварийными дизель-генераторными установками (ДГУ). За время пуска и подключения ДГУ к системе электроснабжения, выбег электродвигателей возрастает настолько, что при самозапуске асинхронных двигателей могут возникать недопустимо большие токи, а синхронные двигатели могут выпасть из синхронизма. Дополнение системы электроснабжения накопителем энергии, способным обеспечить питание потребителей до момента включения аварийного генератора, позволяет существенно повысить надёжность электроснабжения потребителей особой группы.

Применение СНЭ для подавления низкочастотных колебаний режимных параметров

В энергообъединениях существует опасность низкочастотных колебаний (НЧК) параметров режима в диапазоне частот 0,1–2,0 Гц. При недостаточности демпфирующих свойств в энергосистеме может проявиться тенденция к «развитию» колебательного процесса, что может приводить к нарушениям устойчивости и каскадному развитию аварии. Многофункциональность СНЭ и её быстроедействие, позволяют подавлять НЧК при первых признаках их появления [7].

Замещение «вращающегося» резерва

СНЭ, обладая высоким быстроедействием, при условии достаточных значений мощности и энергоёмкости, более всех других известных вариантов резервирования мощности подходит для выполнения функции «вращающегося» резерва.

В тех случаях, когда СНЭ на момент востребования резерва мощности выполняет другие функции, её система управления должна быть автоматически перестроена – функция «вращающегося» резерва должна получить наивысший приоритет с соответствующим понижением приоритетов всех остальных функций. Привлечение СНЭ для реализации «вращающегося» резерва возможно только в том случае, если на момент востребования в накопителе имеется достаточный запас энергии.

Сглаживание резкопеременной нагрузки

Влияние потребителей большой мощности с резко переменным характером нагрузки на работу энергосистемы имеет ряд негативных последствий. Из-за колебаний мощности по питающим линиям электропередачи возрастают потери активной мощности, понижается уровень статической и динамической устойчивости энергосистемы, возрастает вероятность развития низкочастотных колебаний режимных параметров. Установка СНЭ в узле нагрузки позволяет парировать все нежелательные отклонения режимных параметров и стабилизировать их в заданных пределах.

В случае, если в узле нагрузки имеется собственная генерация, то при её соизмеримости с резкопеременной составляющей графика нагрузки и частоте колебаний мощности в диапазоне 1 – 3 Гц, существенно снижается эффективность автоматических регуляторов напряжения и скорости генераторных агрегатов. Установка СНЭ в узле нагрузки позволяет снизить все нежелательные отклонения режимных параметров и стабилизировать их в заданных пределах.

Оптимизация установленной мощности генераторных агрегатов и снижение расхода топлива на автономных электростанциях

На большинстве автономных электростанций используются дизельные, газопоршневые и газотурбинные генераторные агрегаты, количество которых на каждой станции не превышает нескольких единиц. Во многих случаях их коэффициент использования установленной мощности ($K_{иум}$) имеет низкие значения – до 25–35%, что приводит к повышенному расходу топлива. Включение СНЭ в состав автономной электростанции позволяет уменьшить установленную мощность генераторных агрегатов (вплоть до среднего значения графика нагрузки), обеспечить их высокий коэффициент загрузки и существенно сократить расход топлива при условии сохранения максимальной мощности и объёма выработки электроэнергии.

Всё вышеизложенное в полной мере относится к электростанциям подвижных объектов - подъёмные краны с автономными электроэнергетическими установками, речные и морские суда технического флота, на каждом из которых имеются дизель-генераторные электростанции, эксплуатируемые в условиях резкопеременных нагрузок.

Повышение качества электроэнергии в узлах с резко переменной нагрузкой

В узлах энергосистемы с мощной резко переменной нагрузкой, которая приводит к скачкообразным изменениям величины и фазы напряжения, искажению формы кривой напряжения, броскам активной и реактивной мощности большой амплитуды по питающим линиям электропередачи неизбежно встаёт вопрос

стабилизации основных параметров режима и обеспечения качества электроэнергии.

СНЭ обеспечивает стабилизацию напряжения в узле нагрузки. Эту функцию можно рассматривать как дополнительную опцию, к основной (управлению активной мощностью), которая не требует значительных капитальных вложений, т.к. силовая часть для регулирования реактивной мощности остаётся без изменений. Кроме того, актуальной в современных условиях является способность СНЭ выполнять функцию активного фильтра, не пропуская высшие гармоники токов из системы электроснабжения на приёмном конце электропередачи в передающую энергосистему.

Компенсация реактивной мощности и оптимизация её перетоков

Одна из четырёх основных функций СНЭ – управление реактивной мощностью. В узлах установки СНЭ, на фоне выполнения основной функции – управление активной мощностью - целесообразно возложить на них задачу управления реактивной мощностью, заменяя традиционные средства управления, регулирования и компенсации. Быстродействие СНЭ и способность как потреблять, так и выдавать реактивную мощность позволяют применять её не только для регулирования в условиях ведения нормальных режимов, но и для решения задач противоаварийного управления.

Защита генераторных агрегатов от резких изменений нагрузки

Резкие, скачкообразные изменения нагрузки значительной амплитуды в автономных, изолированных энергосистемах, а также работающих в островном режиме, могут приводить к аварийным отключениям газопоршневых установок (ГПУ), которые являются самыми чувствительными к скачкам мощности генераторными агрегатами [8]. В то же время ГПУ по технико-экономическим характеристикам наиболее привлекательны для автономных энергосистем предприятий нефтегазового сектора, как правило, не имеющих связи с объединённой энергосистемой. Быстродействующие СНЭ за счёт сглаживания фронтов импульсов нагрузки способны кардинально решать описанную задачу,

предотвращая аварийное отключение ГПУ [9]. Причём, для этого не требуется большая энергоёмкость накопителя.

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. Снижение амплитуды нерегулярных колебаний при помощи СНЭ позволяет увеличить допустимый переток по сечению.

Повышение эффективности электростанций на возобновляемых источниках энергии

Располагаемая мощность электростанций на основе ВИЭ, прежде всего, ветровых и солнечных имеет стохастическую природу. Стохастический характер имеет и график нагрузки потребителей. Необходимость обеспечивать баланс активной мощности приводит к недоиспользованию располагаемой мощности станции при её избытке или к ограничению нагрузки при её дефиците. Накопители энергии позволяют согласовывать графики генерации и нагрузки, обеспечивая полную загрузку электростанции по фактическому значению потока ветровой или солнечной энергии. Также СНЭ позволяют решать задачу управления энергосистемой при значительной доле ветровой или солнечной генерации.

Выравнивание суточных графиков нагрузки

Обычно суточный график нагрузки энергосистемы имеет характерный ночной минимум и два максимума – утренний и вечерний. СНЭ, обладающая достаточной энергоёмкостью и мощностью, способен накапливать электроэнергию в период ночного минимума при её минимальной цене и возвращать в периоды максимумов с максимальной ценой. Сглаживание суточного графика позволяет уменьшить его максимум и, следовательно, уменьшить потребность в

генерирующей мощности энергосистемы и снизить перетоки мощности по линиям электропередач в периоды максимумов. В настоящее время необходимыми для выравнивания графиков нагрузки параметрами обладают гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) и накопители на сжатом воздухе (ВАЭС), позволяющие накапливать/выдавать в течение нескольких часов значительные объёмы энергии.

Синергетический эффект применения накопителей

Синергетический эффект применения СНЭ [10] определяется возможностью их использования для выполнения не только основных функций регулирования режима, для которых они предназначаются, но и для одновременного выполнения других функций регулирования.

Например, СНЭ, предназначенные для интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистему, или используемые для резервирования ответственных потребителей могут одновременно служить для сглаживания графиков нагрузки, замещать вращающийся резерв энергосистемы, регулировать напряжение и выполнять многие, из описанных в настоящем параграфе, функции, повышая их эффективность и рентабельность.

1.3 Мировой и отечественный опыт применения СНЭ

1.3.1 Мировой опыт применения СНЭ

В мире существуют сотни реализованных проектов с накопителями энергии различных типов. По расчетной мощности накопителей энергии первое место занимает Китай. Это обусловлено тем, что в стране широко применяются гидроаккумулирующие электростанции большой мощности и энергоёмкости. По количеству реализованных проектов различного типа накопителей энергии безоговорочным лидером являются США, где число проектов более чем в 5 раз превышает аналогичный показатель Китая. В США основным типом накопителей энергии являются электрохимические батареи. Их число составляет около 80 % от всех видов накопителей по стране. Высокий спрос на электрохимические накопители энергии делает их наиболее доступными среди других, а также обеспечивает стремительное развитие данного типа накопителя энергии.

Для анализа проектов СНЭ в диссертационной работе использована база данных U.S. Department of Energy Global Energy Storage Database [3]. При анализе не брались в расчет проекты мощностью менее 50 кВА. В описании проектов указана мощность, энергоёмкость и общая категория, к которой относятся накопители электрической энергии, используемые в подсистеме накопления.

НЭ по принципу действия подсистемы хранения подразделяются на типы, основные из которых представлены в таблице 1.1. Внутри каждого типа выделяются разновидности НЭ (например, к разновидностям электрохимических НЭ относятся литий-ионные, проточные, суперконденсаторные и др.).

Таблица 1.1 – Сравнительные показатели основных типов СНЭ

Общий тип		ВАЭС	Водородные	Электрохимические	ГАЭС
Количество	ед	2	13	754	350
	%	0,16	1,04	60,18	27,93
Суммарная мощность	МВт	5,35	20,49	3296,75	183 007,5
	%	0,00	0,01	1,74	96,52
Суммарная энергоёмкость	МВтч	17,4	101,06	7680,08	1 661 911
	%	0,00	0,01	0,45	98,22
Средняя мощность	МВт	2,68	1,58	4,37	522,88
	%	0,48	0,28	0,79	94,05
Средняя энергоёмкость	МВтч	8,73	16,84	10,97	19 102,42
	%	0,05	0,09	0,06	98,91

На долю гидроаккумулирующих электростанций приходятся наибольшие суммарные значения мощности и энергоёмкости.

Гидроаккумулирующие электростанции обычно рассматривают несколько обособленно от других СНЭ не только по причине их большей мощности и энергоёмкости, но и в связи с тем, что ГАЭС уже давно являются традиционным решением и широко применяются в энергосистемах многих стран мира. Кроме того, мобильность и быстрдействие ГАЭС несоизмеримо ниже, чем у наиболее актуальных в настоящее время электрохимических СНЭ.

Наиболее часто в электрохимических СНЭ применяются литий-ионные НЭ (488 проектов – 67% от общего числа).

В таблице 1. 2 и показано распределение электрохимических СНЭ между типами НЭ по величине суммарной установленной мощности и суммарной установленной энергоёмкости.

Таблица 1.2 – Сравнительные показатели разных типов электрохимических СНЭ в именованных и относительных единицах

Тип	Количество, ед (Доля, %)	Суммарная мощность, МВт (%)	Суммарная энергоёмкость, МВт·ч (%)	Средняя мощность, МВт (%)	Средняя энергоёмкость, МВт·ч (%)
Гибридный свинцово-кислотный + суперконденсаторный	8 (1,10)	8 (0,25)	5 (0,07)	1,0 (3,31)	0,6 (0,6)
Суперконденсаторные	27 (3,71)	34 (1,11)	1 (0,01)	1,3 (4,39)	0,1 (0,1)
Свинцово-кислотные	59 (8,10)	166 (5,35)	175 (2,26)	2,8 (9,71)	3,3 (3,07)
Металло-воздушные	6 (0,82)	20 (0,63)	309 (3,99)	3,3 (11,29)	51,5 (47,81)
На основе натрия	63 (8,65)	218 (7,05)	1 357 (17,49)	3,5 (11,99)	22,2 (20,63)
Проточные	73 (10,03)	318 (10,27)	1 233 (15,89)	4,4 (15,08)	16,9 (15,66)
Литий-ионные	488 (67,03)	2 301 (74,30)	4 669 (60,17)	4,7 (16,31)	10,0 (9,27)
На основе никеля	4 (0,55)	32 (1,04)	9 (0,12)	8,1 (27,93)	3,1 (2,85)

На долю литий-ионных СНЭ приходятся наибольшие суммарные мощности и энергоёмкости. Это обусловлено, прежде всего, большим количеством проектов. В то же время их средние значения мощности и энергоёмкости относительно невелики по сравнению с проектами СНЭ других типов.

Подводя итог, следует отметить, что по мощности и энергоёмкости среди действующих проектов СНЭ лидируют ГАЭС, по количеству проектов – новейшие типы НЭ, среди которых преобладают электрохимические.

СНЭ с электрохимическими НЭ – наиболее распространённое решение в области накопления электрической энергии (754 проекта – 60% всех проектов, учитывая ГАЭС).

Среди электрохимических НЭ наиболее широко применяются литий-ионные аккумуляторы (488 проектов – 67% от общего числа СНЭ с электрохимическими НЭ). Из них чаще всего используются литий-железо-фосфатные аккумуляторы (96

проектов – 64% от общего числа СНЭ с литий-ионными НЭ), широкое применение нашли литий-титанатные (21 проект – 14%), литий-полимерные (20 проектов – 14%) и литий-никель-марганец-кобальт-оксидные аккумуляторы (9 проектов – 6%).

Активное развитие и освоение технологий литий-ионных аккумуляторов способствуют значительному снижению себестоимости СНЭ, построенных на их основе, и их востребованности в электроэнергетике. В ближайшие годы эта тенденция, очевидно, сохранится.

Анализ мирового опыта применения СНЭ в электроэнергетике говорит о значительном отставании РФ от ряда стран, в которых технологии накопления получили практическую реализацию. Мировой рынок СНЭ интенсивно развивается. СНЭ находят широкое применение в электроэнергетических системах различных стран мира. Они позволяют принципиально по-новому решать многие проблемы управления нормальными и аварийными режимами энергосистем. Особый интерес к СНЭ проявился в связи с масштабным внедрением ветровых и солнечных электростанций.

То же самое, с некоторым временным лагом, происходит и в отечественной энергетике. В настоящее время, отечественные технологии накопления электроэнергии вышли на уровень практического применения в электроэнергетике. Быстродействующие СНЭ уже сегодня позволяют комплексно и гораздо более эффективно, чем это делается традиционными методами, решать ряд сложных задач [10-13].

Наиболее интенсивно развиваются электрохимические СНЭ с литий-ионными аккумуляторными батареями, которые за последнее десятилетие подешевели вдвое, что заметно сказалось на их инвестиционной привлекательности.

1.3.2 Отечественный опыт применения СНЭ

Согласно DOE OE Global Energy Storage Database [3] в РФ реализовано 7 проектов СНЭ (4 из них – ГАЭС).

Однако, анализируемая база данных не отражает полной картины. В 2019-ом году Новосибирской компанией ООО «Системы накопления энергии» и специалистами Новосибирского государственного технического университета были реализованы два проекта СНЭ [14]. СНЭ установлены в поселках Мугур-Аксы и Кызыл-Хая (республика Тыва). Мощности и энергоёмкости СНЭ 100 кВА/250 кВт·ч и 400 кВА/460 кВт·ч. СНЭ используются в составе автономных гибридных энергетических установок. В их состав входят дизель-генераторы, солнечная электрическая станция и СНЭ. Задача СНЭ обеспечивать стабильную совместную работу энергетического оборудования, повышая ее экономическую эффективность. В 2020-ом году в эксплуатацию введена Бурзянская СЭС (республика Башкортостан) мощностью 10 000 кВт. В состав СЭС входит СНЭ мощностью 4 000 кВА и энергоёмкостью 8 000 кВт·ч.

В таблице 1.3 сведены реализованные проекты СНЭ в РФ за исключением ГАЭС.

Таблица 1.3 – Реализованные проекты СНЭ в РФ (без учёта ГАЭС)

№	Местоположение	Тип аккумуляторов	Мощность, кВА/ Энергоёмкость, кВ·ч	Назначение
СНЭ в составе ЕЭС России				
1	г. Москва	Цинк-бромные	25/25	Снижение затрат на покупку электроэнергии
2	ПС Сколково, Московская обл.	Литий-никель- марганец- кобальтатные (НМК)	1200/1000	ИБП
3	ПС Смирново, Московская обл.	(НМК)	1200/1000	ИБП
4	ПС Веселое, г. Сочи	НМК	600/500	ИБП
5	ПС Спортивная, г. Сочи	НМК	600/500	ИБП
6	ПС Псоу, г. Сочи	НМК	1500/2500	ИБП

Продолжение таблицы 1.3

№	Местоположение	Тип аккумуляторов	Мощность, кВА/ Энергоемкость, кВ·ч	Назначение
7	ПС Волхов-Северная, г. Санкт-Петербург	НМК	1500/2500	ИБП
8	ПС Восход, г. Омск	НМК	1200/1000	ИБП
9	Зарядная станция для электромобилей, г. Рязань	Литий-железо-фосфатные (ЛЖФ)	22/100	Снижение пиковой мощности; снижение затрат на покупку электроэнергии; ИБП
10	Инженерный дом АО «РТСофт», г. Москва	ЛЖФ	60/67.2	Снижение затрат на покупку электроэнергии
11	Самарская область, г. Жигулевск	ЛЖФ	200/210	Снижение затрат на покупку электроэнергии
12	Сеть 0,4 кВ мкр. Юго-Западный, г. Белгород	Литий-ионные	10/53	Повышение надёжности электроснабжения и качества электроэнергии
13	Бурзянская солнечная электростанция, Башкортостан	ЛЖФ	4000/8000	Сглаживание резких изменений мощности СЭС; ИБП
СНЭ в автономных энергосистемах				
14	Забайкальский край, с. Менза	ЛЖФ	90/300	Оптимизация работы солнечно-дизельной электростанции
15	Республика Тыва, с. Мугур-Аксы	ЛЖФ	400/373	Оптимизация работы солнечно-дизельной электростанции
16	Республика Тыва, с. Кызыл-Хая	ЛЖФ	100/204	Оптимизация работы солнечно-дизельной электростанции

Как следует из таблицы, в основном используются электрохимические СНЭ с литий-ионными аккумуляторными батареями, которые за последнее десятилетие подешевели вдвое, что заметно сказалось на их инвестиционной привлекательности.

Выводы по главе 1

Внедрение СНЭ в электроэнергетические системы - одно из ключевых направлений развития современной электроэнергетики. Распоряжением правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1526-р зафиксирован план мероприятий по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации Национальной технологической инициативы по направлению "Энерджинет" (в план внесены вопросы применения СНЭ).

Современные технологии накопления энергии выходят на рентабельный уровень реализации проектов. Быстродействие и многофункциональность современных СНЭ позволяют применять их для решения множества актуальных задач в электроэнергетике. В том числе для управления режимами, повышения надежности, устойчивости, живучести энергосистем. Основным катализатором развития и внедрения СНЭ является широкое внедрение ВИЭ, которые обладают стохастическим характером генерации. В РФ активизируются работы по применению СНЭ в электроэнергетике. В настоящее время на территории РФ реализовано 16 проектов с применением СНЭ (без учета ГАЭС).

В настоящее время наблюдается устойчивый рост числа проектов применения СНЭ в энергетике. Современные технологии накопления энергии делают возможным применение СНЭ экономически выгодным. Этому дополнительно способствует многофункциональность СНЭ. Одновременное использование СНЭ для решения нескольких задач, зачастую увеличивает общую экономическую эффективность проекта с использованием СНЭ.

Наиболее востребованной и перспективной технологией СНЭ являются ЛИА. В мире использование СНЭ на ЛИА занимает первое место по количеству реализованных проектов. Несмотря на общее отставание РФ как в производстве СНЭ, так и в реализации проектов с применением СНЭ, наблюдается положительная динамика. Экспертами прогнозируется [6] рост применения СНЭ на территории РФ.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЭ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

2.1 Оценка применимости промышленных программно-вычислительных комплексов для расчётов переходных процессов в СНЭ в составе энергосистемы

Внедрение в состав электроэнергетических систем новых элементов – современных быстродействующих НЭ - требует создания соответствующих математических моделей, позволяющих адекватно решаемым задачам представлять накопители, наряду с прочими элементами энергосистемы, в современных программных вычислительных комплексах (ПВК). Учитывая большое многообразие типов накопителей, возникает закономерный вопрос – следует ли разрабатывать модель для каждого типа накопителя или создать одну, общую для близких по структуре и функциональным возможностям. Очевидно, что первый вариант актуален при необходимости подробно исследовать и учитывать процессы непосредственно в элементах накопления и хранения энергии, для чего следует использовать индивидуальную математическую модель для каждого типа накопителя. Так же очевидно, что для массовых расчётов, если процессы в элементах накопления не являются целью исследования, предпочтительней второй вариант.

СНЭ - это установка, подключенная к электрической сети, которая извлекает электроэнергию из электроэнергетической системы, хранит эту энергию внутри себя в какой-либо форме и в необходимый момент возвращает её обратно. В составе СНЭ независимо от типа накопителя и способа хранения энергии как правило можно выделить четыре основные подсистемы: распределения, преобразования, накопления и управления. Но при анализе взаимодействия СНЭ с энергосистемой её необходимо рассматривать как отдельный, самостоятельный элемент наравне, например, с генераторным агрегатом или любым другим оборудованием, обладающим определёнными характеристиками и свойствами.

Независимо от способа накопления энергии, взаимодействие СНЭ с энергосистемой, в состав которой он включён, энергообмен между ними определяется напряжением и током на зажимах СНЭ. Кроме этого, в отличие от традиционных элементов энергосистемы, для СНЭ характерен ещё один параметр - количество накопленной энергии, которое в процессе взаимодействия СНЭ с энергосистемой постоянно меняется и учёт которого необходим для расчёта зависящих от него параметров. Таким образом, если СНЭ рассматривается как самостоятельный элемент энергосистемы, а процессы, протекающие в подсистемах СНЭ, не являются предметом исследования, достаточно, чтобы её математическая модель давала взаимосвязь между основными режимными параметрами на зажимах СНЭ.

СНЭ – сложная система, состоящая из многих элементов. Представление каждого из них подробной математической моделью значительно усложняет модель СНЭ в целом и приводит к необходимости использовать при её применении метод мгновенных значений переменных, что намного усложняет процесс расчёта за счёт увеличения числа переменных, уменьшения шага расчета и значительного увеличения времени расчётов. Но для исследования электромагнитных переходных процессов этот метод является наиболее приемлемым. Для относительно простых энергосистем метод также применим для расчёта электромеханических переходных процессов.

В то же время при массовых расчётах режимов или электромеханических переходных процессов в энергосистемах, СНЭ достаточно представлять интегральными режимными параметрами без детализации её отдельных элементов: действующими значениями токов, напряжений, активной и реактивной мощностью, количеством накопленной энергии.

Принимая во внимание вышесказанное можно сформулировать следующие требования к математической модели СНЭ в составе электроэнергетической системы:

1. Модель должна быть пригодна для моделирования основных актуальных типов СНЭ – на базе аккумуляторных батарей, суперконденсаторов,

сверхпроводниковых индуктивных накопителей, электромеханических (кинетических) накопителей.

2. Модель должна устанавливать взаимосвязь основных параметров режима (токов, напряжений, мощностей) на зажимах СНЭ без учёта её внутренней структуры (принцип «чёрного ящика»).
3. Для расчёта режимов и переходных процессов в энергосистеме модель СНЭ должна быть совместима с ПВК, используемыми в практике расчётов режимов и переходных процессов в энергосистемах:
 - для расчёта электромагнитных переходных процессов моделирование должно производиться по мгновенным значениям переменных;
 - для расчёта электромеханических переходных процессов моделирование должно производиться по действующим значениям переменных.
4. Модель должна учитывать изменение заряда подсистемы накопления и изменение связанных с ним характеристик СНЭ в процессе энергообмена с энергосистемой.
5. Модель должна учитывать процесс саморазряда в подсистеме накопления.
6. Модель должна учитывать потери мощности в подсистемах преобразования и распределения при заряде/разряде СНЭ.
7. В модели должна быть предусмотрена возможность создания пользователем (исследователем) системы управления СНЭ верхнего уровня, связывающую любой набор режимных параметров энергосистемы и желаемые значения активной и реактивной мощности на зажимах СНЭ.

Для исследования, анализа и расчета установившихся режимов и переходных процессов (электромагнитных и электромеханических) в электроэнергетических системах используется ряд ПВК. Наиболее известные из них: Matlab/Simulink, PowerFactory, ETAP, EuroStag, RuStab, PSCad.

В таблице 2.1 сведены основные характеристики ПВК и дана оценка возможности моделирования СНЭ с их помощью.

Matlab/Simulink. Основное назначение ПВК Matlab/Simulink при анализе процессов в энергосистемах - моделирование электромагнитных переходных процессов. В ПВК Matlab/Simulink отсутствует готовая модель системы накопления электрической энергии, как единого устройства. Стандартные библиотеки Matlab/Simulink предлагают пользователю типовые модели составных элементов СНЭ: модели аккумуляторов, суперконденсаторов, силовых преобразователей, пассивных фильтров (конденсаторы, катушки индуктивности), силовых трансформаторов. Стандартные модели элементов СНЭ в ПВК Matlab/Simulink учитывают характеристики отдельных элементов.

При работе с ПВК Matlab/Simulink пользователю необходимо самостоятельно создать систему автоматического регулирования подсистемы преобразования СНЭ для способной обеспечить заданный закон или алгоритм управления активной/реактивной мощностью в функции избранных режимных параметров энергосистемы. Использование типовых моделей ПВК Matlab/Simulink предполагает расчет переходных процессов по мгновенным значениям токов и напряжений. Для расчёта переходных электромеханических процессов в энергосистемах применять этот ПВК нецелесообразно. Это связано с тем, что расчет по мгновенным значениям требует больших вычислительных ресурсов по сравнению с расчетом по действующим значениям, особенно для многомашинных систем. Кроме того, требуется полностью моделировать и систему управления преобразователем, что дополнительно существенно усложняет задачу

Вывод: Matlab/Simulink малопригоден для создания на его базе модели СНЭ, пригодной для массовых расчетов электромеханических переходных процессов из-за отсутствия возможности расчета по действующим значениям токов и напряжений и сложности разработки системы управления преобразователем.

PowerFactory. Основное назначение ПВК PowerFactory - расчет установившихся режимов и моделирование электромеханических переходных процессов в энергосистемах. ПВК PowerFactory в своем составе имеет модель СНЭ,

как отдельного элемента. СНЭ может быть задана источником тока или напряжения. Пользователю нет необходимости создавать замкнутую СУ для обеспечения требуемой выдаваемой/потребляемой мощности. Пользователь создает только СУ для основного функционального алгоритма. Модель СНЭ предназначена для расчета установившихся режимов и электромеханических переходных процессов. При этом стандартная модель СНЭ в ПВК PowerFactory не учитывает зарядные, разрядные характеристики накопителей, характеристики и ограничения по току силовых преобразователей, коэффициенты полезного действия элементов, саморазряд элементов хранения энергии. Таким образом, модель сводится к управляемому источнику тока/напряжения без учёта реальных характеристик, присущих СНЭ и её элементам.

Вывод: модель СНЭ в ПВК PowerFactory не соответствует требованиям, предъявляемым к модели СНЭ пригодной для расчета электромеханических переходных процессов по следующим причинам – не учитываются зарядные и разрядные характеристики накопителя; не учитывается саморазряд СНЭ; не учитывается длительно-допустимая выдаваемая/потребляемая мощность (ток) СНЭ; не учитываются потери энергии при её преобразовании, не учитывается постоянно изменяющийся в процессе энергообмена с энергосистемой уровень заряда.

ETAP. Основное назначение ПВК ETAP - расчет установившихся режимов и электромеханических переходных процессов. В ПВК ETAP отсутствует готовая модель системы накопления электрической энергии, как единого устройства. Стандартные библиотеки ETAP предлагают пользователю типовые модели составных элементов СНЭ, по аналогии с ПВК Matlab/Simulink. Пользователю, помимо создания СУ для основного функционального алгоритма, необходимо создать замкнутую систему автоматического регулирования подсистемы преобразования СНЭ. ПВК ETAP учитывает коэффициенты полезного действия, зарядные и разрядные характеристики накопителей, ограничения по токам преобразователя и элементов накопления, саморазряд. При условии создания СУ модель СНЭ на базе ETAP пригодна для расчетов электромагнитных переходных

процессов по мгновенным значениям токов и напряжений. Для расчета электромеханических переходных процессов модель не пригодна. Основная область применения модели: анализ принципов работы преобразовательной техники, анализ режимов работы аккумуляторов. Модель пригодна для расчета электромагнитных переходных процессов.

Вывод: модель СНЭ на основе ПВК ETAP не соответствует требованиям, предъявляемым для модели СНЭ для расчета электромеханических переходных процессов, по следующим причинам - отсутствует возможность расчета по действующим значениям переменных, необходима разработка СУ транзисторным преобразователем.

EuroStag. Основное назначение ПВК EuroStag - расчет установившихся режимов и электромеханических переходных процессов. Модель СНЭ в ПВК EuroStag по составу и функционалу подобна модели СНЭ в ПВК PowerFactory. СНЭ представляется управляемым источником тока/напряжения, без учета характеристик отдельных элементов. Пользователю, также необходимо создать СУ для основного функционального алгоритма.

Вывод: модель СНЭ в EuroStag не соответствует требованиям, предъявляемым для модели СНЭ по следующим пунктам: учет зарядных и разрядных характеристик накопителя; учет саморазряда СНЭ; учет длительно-допустимой выдаваемой/потребляемой мощности (тока) СНЭ; учет потерь энергии при её преобразовании.

RuStab. Основное назначение ПВК RuStab - расчет электромеханических переходных процессов. ПВК RuStab – надстройка на ПВК RastrWin, которая позволяет рассчитывать переходные процессы. Модель СНЭ в ПВК RuStab отсутствует. Для моделирования СНЭ необходимо создавать собственную (пользовательскую) модель.

Вывод: модель СНЭ в RuStab отсутствует.

PSCad. Основное назначение ПВК PSCad - моделирование электромагнитных переходных процессов. В ПВК PSCad отсутствует модель СНЭ, но имеются отдельные элементы СНЭ по аналогии с ПВК Matlab/Simulink и ETAP.

Пользователю, помимо создания СУ для основного функционального алгоритма, необходимо создать систему автоматического регулирования подсистемы преобразования СНЭ для обеспечения необходимой величины и направления активной/реактивной мощности. При создании модели СНЭ в ПВК PSCAd модель будет пригодна для расчета электромагнитных переходных процессов по мгновенным значениям переменных.

Вывод: ПВК PSCad не применима для расчёта СНЭ т.к. в нём отсутствует возможность расчета по действующим значениям переменных и необходима разработка СУ транзисторным преобразователем.

Примечания к таблице 2.1

Графа «учет характеристик накопителей энергии» отражает наличие в модели СНЭ или её элементах следующих характеристик и параметров: зарядные, разрядные характеристики накопителей; ограничения по минимальному и максимальному уровню заряда; ограничения по располагаемой мощности накопителя, ограничение по допустимому току накопителя,

Графа «учет характеристик подсистемы преобразования» отражает наличие в модели СНЭ или её элементах следующих характеристик и параметров: ограничения по длительно-допустимому току силового преобразователя, ограничения по максимальному и минимальному рабочему напряжению на стороне DC преобразователя, ограничения по максимальному и минимальному рабочему напряжению на стороне AC преобразователя, учет PQ-диаграммы преобразователя

Таблица 2.1 – Сравнение математических моделей СНЭ в ПВК

№ пп	Название ПВК (разработчик, страна разработчика)	Основное назначение ПВК, область применения	Возможность расчета УР / ПП по действующим / ПП по мгновенным значениям переменных	Учет изменения запасенной энергии в накопителе электрической энергии	Учет характеристик элементов СНЭ и ограничения режимных параметров	Учет саморазряда накопителя электрической энергии	Учет потерь при заряде / разряде СНЭ	Наличие системы управления СНЭ	Наличие модели СНЭ как единого устройства
1	2	3	4	5	6	7	9	10	11
1	DIgSILENT PowerFactory (DIgSILENT, Германия)	Промышленный комплекс для расчёта УР, статической и динамической устойчивости, расчета эл. мех. переходных процессов Предназначен для решения задач проектирования, анализа энергосистем	Да/Да/Да	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Да
2	MATLAB – Simulink (MathWorks, США)	Решение нетиповых, исследовательских задач	Да/Нет/Да	Да. Есть отдельная модель НЭ с динамическим уровнем заряда	Да. Есть отдельные модели элементов со своими ограничениями	Да. Есть отдельная модель НЭ с учётом саморазряда	Да. Есть отдельные модели элементов с учётом КПД	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Имеется набор моделей элементов электрических цепей, из которых можно собрать желаемую электрическую схему СНЭ
3	ETAP (ETAP, США)	Промышленный комплекс для расчёта УР, статической и динамической устойчивости, расчета эл. мех. переходных процессов. Предназначен для решения задач проектирования, анализа энергосистем	Да/Да/Да	Да. Есть отдельная модель НЭ с динамическим уровнем заряда	Да. Есть отдельные модели элементов со своими ограничениями	Да. Есть отдельная модель НЭ с учётом саморазряда	Да. Есть отдельные модели элементов с учётом КПД	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Имеется набор моделей элементов электрических цепей, из которых можно собрать желаемую электрическую схему СНЭ.

№ пп	Название ПВК (разработчик, страна разработчика)	Основное назначение ПВК, область применения	Возможность расчета УР / ПП по действующим / ПП по мгновенным значениям переменных	Учет изменения запасенной энергии в накопителе электрической энергии	Учет характеристик элементов СНЭ и ограничения режимных параметров	Учет саморазряда накопителя электрической энергии	Учет потерь при заряде / разряде СНЭ	Наличие системы управления СНЭ	Наличие модели СНЭ как единого устройства
1	2	3	4	5	6	7	9	10	11
4	EUROSTAG (Tractebel, EDF, Франция, Бельгия)	Промышленный комплекс для расчёта УР, статической и динамической устойчивости, расчета эл. мех. переходных процессов. Предназначен для решения задач проектирования, анализа энергосистем	Да/Да/Да	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Да
5	RastrWin – RUSTab (Екатеринбургский фонд «Фонд им. Д.А. Арзамасцева», РФ)	Промышленный комплекс для анализа статической и динамической устойчивости, расчета эл. мех. переходных процессов. Предназначен для задач проектирования, анализа энергосистем	Да/Да/Да	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Возможно реализовать посредством программирования
6	PSCAD (Manitoba Hydro International, Канада)	Расчет электромагнитных переходных процессов. Моделирование и расчет средств РЗА в энергосистемах. Используется в задачах проектирования, разработки новых средств РЗА, FACTS, ВИЭ, защиты от перенапряжений и др.	Да/Да/Да	Да. Есть отдельная модель НЭ с динамическим уровнем заряда	Да. Есть отдельные модели элементов со своими ограничениями	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Да. Есть отдельные модели элементов с учётом КПД	Нет. Возможно реализовать посредством программирования	Нет. Имеется набор моделей элементов электрических цепей, из которых можно собрать желаемую электрическую схему СНЭ

2.2 Требования к математической модели СНЭ в составе энергосистемы

Анализ возможностей современных программных вычислительных комплексов, предназначенных для расчётов электромеханических переходных процессов, показывает, что они либо не имеют в своей инструментрии готовые к использованию математические модели СНЭ, либо предлагаемые ими модели не учитывают в достаточной мере характеристики основных элементов СНЭ и особенности их функционирования в составе энергосистемы. Для того, чтобы при расчётах переходных электромеханических процессов можно было представлять СНЭ как элемент энергосистемы так же, как и любой другой традиционный элемент, необходима математическая модель СНЭ удовлетворяющая следующим требованиям:

- проведение расчётов по действующим значениям переменных;
- модель должна быть готова к использованию без предварительной разработки математической модели системы автоматического управления двунаправленным преобразователем нижнего уровня, (то есть без моделирования управления каждым транзистором преобразователя в отдельности);
 - должны быть учтены характеристики подсистемы накопления;
 - должна быть предусмотрена возможность моделирования СНЭ с различными типами подсистем накопления (электрохимические аккумуляторы, суперконденсаторы, электромеханические, сверхпроводниковые индуктивные);
 - модель должна учитывать характеристики и параметры двунаправленного преобразователя (диапазоны рабочих напряжений на стороне постоянного и переменного токов, длительно допустимые и кратковременные перегрузки по току, потери энергии при преобразовании и т.п.);
 - модель должна обеспечивать точность расчёта, адекватную точности моделей других элементов энергосистемы.

Кроме того, в математической модели должны быть отражены следующие характерные особенности работы СНЭ:

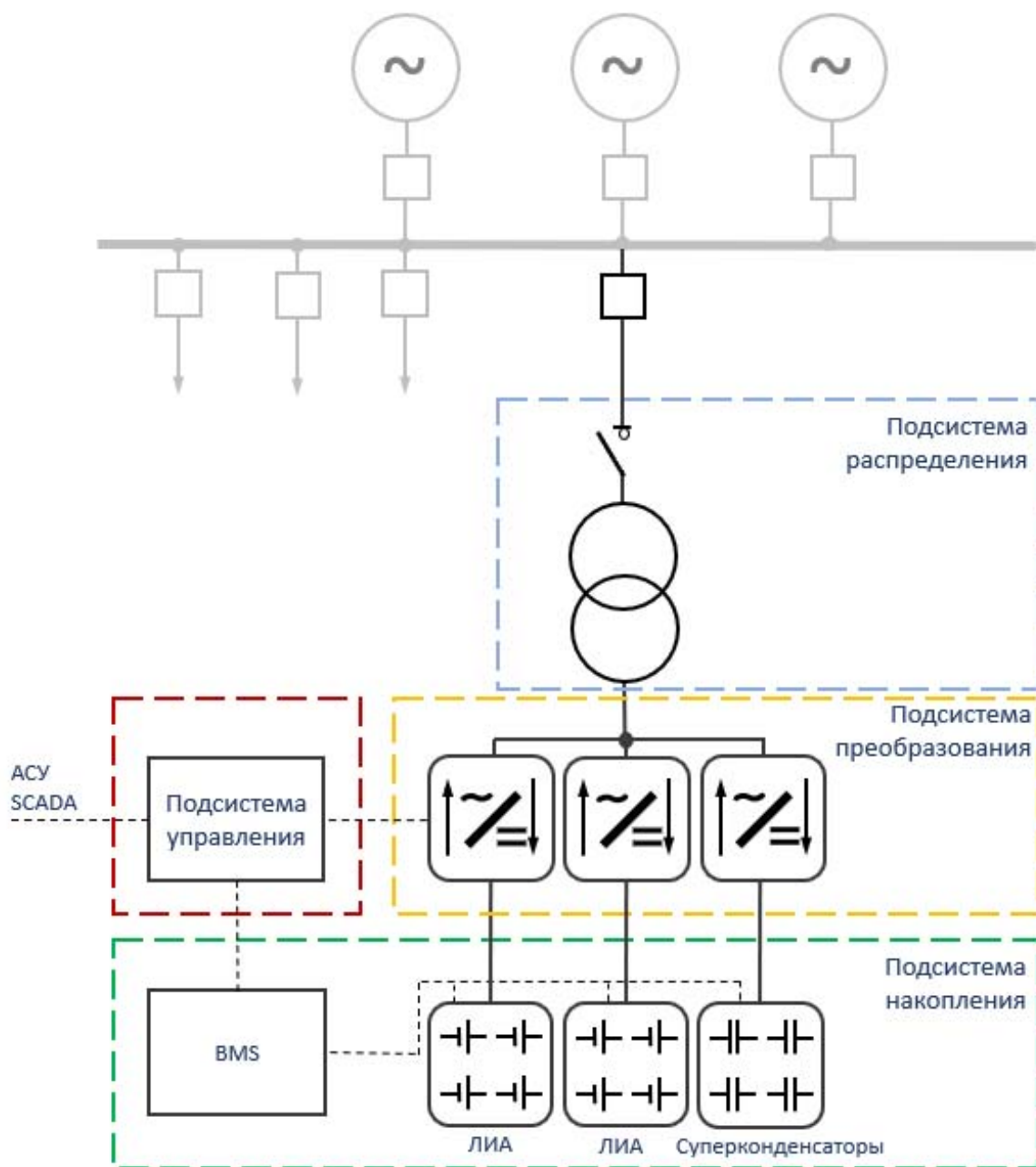
- изменение уровня заряда подсистемы накопления в процессе энергообмена;
- ограничение по минимальному и максимальному допустимым уровням заряда элементов подсистемы накопления;
- учёт саморазряда элементов накопления энергии;
- учёт зависимости располагаемой мощности от уровня заряда;
- учёт предельных значений допустимых токов заряда/разряда подсистемы накопления;
- коэффициенты полезного действия элементов системы накопления энергии при заряде и разряде;
- ограничение по максимально выдаваемой/потребляемой активной и реактивной мощности преобразователя;
- ограничение по номинальному току преобразователя;
- допустимый диапазон рабочего напряжения на стороне постоянного тока;
- допустимый диапазон рабочего напряжения на стороне переменного тока;

Необходимо учесть, что разрабатываемая математическая модель СНЭ должна быть совместима с программными комплексами, которые применяются для расчета установившихся режимов и электромеханических переходных процессов энергосистем. Она не должна сколько-нибудь значительно увеличивать время расчёта переходных процессов в энергосистеме и требовать значительных вычислительных мощностей ЭВМ.

2.3 Структуры СНЭ на базе аккумуляторных батарей большой мощности и суперконденсаторов, их основные характеристики

На сегодняшний день уже сформировалась практически традиционная структура СНЭ на базе аккумуляторных батарей и суперконденсаторов. В ней обычно выделяют четыре основные подсистемы: распределения, преобразования, управления и накопления. В зависимости от технического задания и

конструкторского решения структура СНЭ может несколько меняться. В качестве примера рассмотрим структурную схему гибридной СНЭ, представленную на рисунке 2.1 [15]. В гибридной СНЭ в подсистеме накопления используются два или более различных типов элементов накопления энергии. В рассматриваемом случае используются суперконденсаторы и литий-ионные аккумуляторные батареи.



(BMS – Battery management system (система управления батареями), АСУ – автоматизированная система управления, SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (диспетчерское управление и сбор данных), ЛИА – литий-ионные аккумуляторы)

Рисунок 2.1 – Структура гибридной системы накопления электрической энергии

Каждая из подсистем СНЭ выполняет определённые функции:

- Подсистема накопления энергии. Комплектуется аккумуляторными батареями и батареями суперконденсаторов, которые соединены последовательно/параллельно. Контроль процессом заряда/разряда, мониторинг состояния элементов, балансировка по уровню заряда отдельных элементов осуществляются системой BMS.
- Подсистема преобразования. Осуществляет преобразование напряжения постоянного тока (подсистемы накопления энергии) в напряжение переменного тока и обратно. Основным элементом подсистемы – двунаправленный (реверсивный) преобразователь AC/DC, имеющий собственную подсистему управления, которая обеспечивает настройку, согласование работы с другими подсистемами, управляющие воздействия для реализации заданных алгоритмов.
- Подсистема распределения. Имеет в составе коммутационные аппараты, согласующие и измерительные трансформаторы, аппараты релейной защиты. Мониторинг и управление входящими в состав подсистемы распределения элементами организованы через цифровые интерфейсы от подсистемы управления. Возможна реализация СНЭ без силового трансформатора. Обычно безтрансформаторные компоновки, используются при подключении СНЭ не большой мощности (менее 30 кВА) к сети 0,4 кВ.
- Подсистема управления. Обеспечивает совместную работу всех упомянутых подсистем (реализацию требуемых алгоритмов работы, настройку СНЭ, мониторинг, двусторонний информационный обмен с системами среднего и верхнего уровней (системами управления другого оборудования, АСУ, SCADA, и т.д.)). В состав подсистемы входит экспертная система самодиагностики, выдающая сигналы о состоянии СНЭ в целом и её составляющих с указанием единичных неисправных элементов и рекомендациями по их техническому обслуживанию.

Наиболее востребованные и быстрорастущие технологии накопления энергии (за исключением ГАЭС) основываются на литий-ионных аккумуляторах и суперконденсаторах. Использование различных технологий накопления энергии

накладывает специфические ограничения на СНЭ в целом, при этом конкретные ограничения зависят от типа накопителя энергии.

При моделировании СНЭ особое внимание необходимо обратить на наиболее значимыми параметры, определяющие её основные свойства, как элемента энергосистемы: номинальную мощность и энергоёмкость. Важность вопроса удобно показать, сравнивая характеристики аккумулирующих элементов двух вариантов подсистемы накопления СНЭ: на литий-ионных аккумуляторах (ЛИА) и на суперконденсаторах (СК). Для примера сопоставим их энергетические характеристики.

Для каждого типа подсистемы преобразования энергии СНЭ используются индивидуальные реверсивные преобразователи, учитывающие особенности их аккумулирующих элементов. Однако, разработка реверсивного преобразователя и компоновка подсистем накопления выходят за рамки настоящей диссертации.

Ниже рассматриваются энергетические характеристики аккумулирующих элементов СК и ЛИА.

Параметры аккумулирующих элементов СК MO-150V53F-0 и ЛИА GBS 100 Ah приведены в таблицах 2.2 [16] и 2.3 [17] соответственно и дополняются разрядной характеристикой ЛИА, представленной на рисунке 2.2 [17].

Таблица 2.2 – Основные параметры модуля СК MO-150V53F-0 [16]

Номинальное напряжение	151,2 В
Максимальное напряжение	159,6 В
Электрическая ёмкость	53,5 Ф
Максимальное эквивалентное сопротивление	10,2 мОм
Рабочий ток (номинальный)	200 А

Таблица 2.3 – Основные параметры модуля ЛИА GBS 100 Ah [17]

Номинальное напряжение	3,2 В
Максимальное напряжение	3,4 В
Номинальная емкость, С	100 А·ч
Максимальный длительный ток заряда	300 А
Максимальный длительный ток разряда	300 А

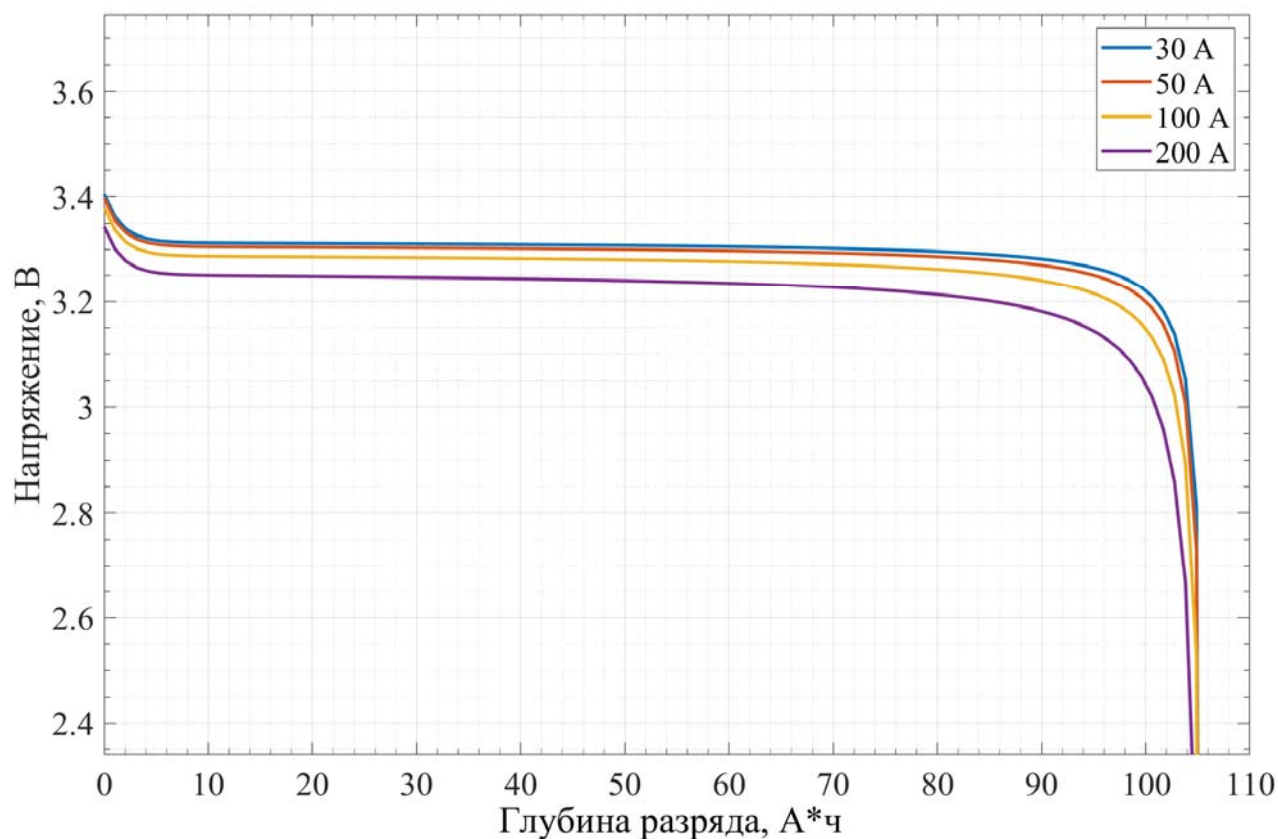


Рисунок 2.2 – Разрядная характеристика ЛИА GBS 100 Ah при различных значениях тока разряда [17]

Два основных параметра СНЭ любого типа – номинальная мощность и номинальная энергоёмкость. Первый параметр определяет значение мощности, на которое рассчитаны все силовые элементы СНЭ. Второй параметр требует дополнительных пояснений.

Во-первых, количество энергии, которое может быть запасено в подсистеме накопления при максимально допустимом напряжении на стороне постоянного тока подсистемы преобразования определяется параметрами накопителей электроэнергии – ЛИА или СК. Это количество энергии определяет **номинальную энергоёмкость** подсистемы накопления СНЭ (W_n). Если пренебречь очевидными физическими ограничениями, в процессе энергообмена аккумулирующие элементы СНЭ теоретически могут полностью (в пределах полной энергоёмкости) заряжаться и разряжаться.

Во-вторых, при соблюдении технологических ограничений, обусловленных в том числе и характеристиками подсистем распределения и преобразования, в

процессе заряда и разряда невозможно задействовать в нормальном технологическом энергообмене полную энергоёмкость.

В-третьих, от глубины разряда $K_{г.р.}$ в процессе отработки циклов заряд/разряд зависит срок службы аккумулирующих элементов. Под глубиной разряда ($K_{г.р.}$) понимается отношение обменной энергоёмкости к номинальной энергоёмкости СНЭ с учетом потерь мощности при энергообмене. Другими словами, $K_{г.р.}$ - величина, показывающая долю энергии от номинальной энергоёмкости СНЭ, которая задействована в энергообмене между СНЭ и энергосистемой. Определяется выражением:

$$K_{г.р.} = \frac{W_{обм}}{W_{ном} \cdot \eta_{СНЭ}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

где $\eta_{СНЭ}$ – общий КПД СНЭ (учитывает КПД двунаправленного преобразователя, фильтра, ЛИА и силового трансформатора).

$W_{обм}$ – обменная энергоёмкость. Под обменной энергоёмкостью понимается количество энергии, которым СНЭ должна обмениваться с энергосистемой в процессе управления мощностью при решении поставленной перед СНЭ задачей.

Если для СК, учитывая их способность выдерживать большое количество полных циклов заряд/разряд (не менее 100 000) [18], глубина циклов не столь актуальна, то для ЛИА при глубине разряда 80% число циклов составляет 3000-4000, после чего структура аккумуляторов необратимо деградирует [19]. Для управления СНЭ необходимо знать, какое наибольшее количество энергии из общего объёма можно использовать для обмена с энергосистемой. Этот объём энергии целесообразно определить термином «энергия, доступная для обмена» ($W_{д.обм.}$), обозначая то максимальное количество энергии, которое может быть использовано при обмене энергией между СНЭ и энергосистемой и которое рассчитывается с учётом всех ограничений и особенностей работы подсистем накопления и преобразования энергии.

Энергия, запасенная в суперконденсаторе, определяется выражением:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (2.2)$$

где C – электрическая емкость суперконденсатора, Ф; U – напряжение на зажимах суперконденсатора, В

Для накопителей на базе СК величина энергии, которую можно использовать для обмена с энергосистемой, зависит от рабочего диапазона напряжения на стороне постоянного тока реверсивного преобразователя. Если, например, принять отношение минимального и максимального рабочего напряжения равным 0,6 [20], то, учитывая нелинейную зависимость запасённой энергии в СК от напряжения, при таком соотношении минимального и максимального напряжения на зажимах СК для обмена с энергосистемой может быть использовано только:

$$(1 - 0,6^2) \cdot 100 = (1 - 0,36) \cdot 100 = 64\%$$

от полной энергоемкости модуля СК.

С учетом вышесказанного, доступная для обмена энергоёмкость для модуля СК MO-150V53F-0 определяется выражением:

$$W_{\text{д.обм}} = 0,64 \cdot \frac{C \cdot U_{\text{ном.СК}}^2}{2} = 0,391 \text{ МДж} = 0,109 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.3)$$

где C – электрическая ёмкость модуля СК, Ф; $U_{\text{ном.СК}}$ – номинальное напряжение модуля СК, В.

В условиях нормальной эксплуатации ЛИА его уровень заряда не должен быть меньше 10 % и больше 90 % [19] (т.е. использовать можно не более 80% от полной энергоемкости). Ввиду этой особенности величина доступной для обмена энергоёмкости единичного элемента ЛИА GBS 100 Ah равна:

$$W_{\text{д.обм}} = 0,8 \cdot U_{\text{ЛИА ном}} \cdot C = 256 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 0,256 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.4)$$

где C – ёмкость единичного аккумуляторного модуля, А·ч; $U_{\text{ЛИА ном}}$ – номинальное напряжение единичного аккумуляторного модуля, В.

В процессе энергообмена степень заряда подсистемы накопления непрерывно изменяется, что в свою очередь приводит к изменению максимального значения мощности, которую способна потреблять/отдавать СНЭ в режиме заряда/разряда.

Это значение мощности – *располагаемая мощность*. В процессе управления мощность СНЭ может принимать любые значения в диапазоне от 0 до величины

располагаемой мощности, причём сама располагаемая мощность непрерывно изменяется при изменении степени заряда. Степень заряда определяется как отношение фактического количества энергии в подсистеме хранения W_ϕ к её номинальной энергоёмкости E_n [21]:

$$K_z = \frac{W_\phi}{W_H} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

Следует отметить, что значения располагаемой мощности на потребление и выдачу в общем случае отличаются друг от друга.

Зависимость располагаемой мощности модуля СК МО-150V53F-0 от степени заряда представлена на рисунке 2.3, при этом учитывается ограничение по минимальному напряжению на стороне постоянного тока преобразователя. Располагаемая мощность модуля меняется нелинейно в диапазоне 18,2 – 30,2 кВт. Таким образом, минимальное значение располагаемой мощности модуля СК составляет 18,2 кВт, максимальное – 30,2 кВт.

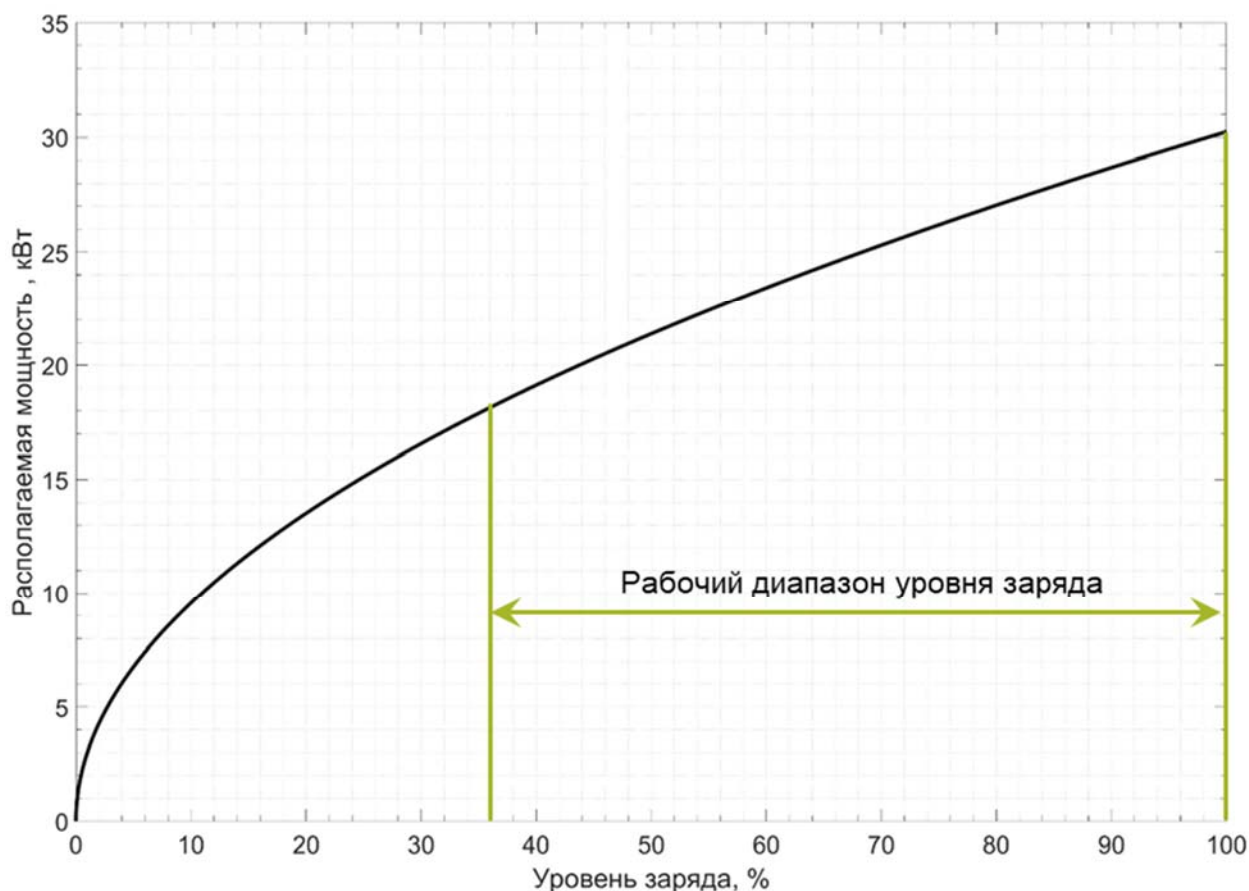


Рисунок 2.3 – Зависимость располагаемой мощности модуля СК МО-150V53F-0 от степени заряда

Зависимость располагаемой мощности единичного аккумулятора ЛИА GBS 100 Ah рассчитывается аналогичным образом за исключением некоторых особенностей. Для ЛИА задаются максимальный длительный ток заряда и максимальный длительный ток разряда. В рассматриваемом примере они равны между собой и соответствуют значению $3C$. C – номинальная емкость ЛИА (100 А·ч). Значение тока в амперах составит:

$$I_{3C} = 3 \cdot C = 3 \cdot 100 = 300 \text{ А} \quad (2.6)$$

При расчёте располагаемой мощности для одного элемента ЛИА необходимо учесть, что для нормальной эксплуатации степень заряда должна находиться в диапазоне 10 – 90 % [19]. С учётом этого построена зависимость располагаемой мощности ЛИА от степени заряда (рисунок 2.4).

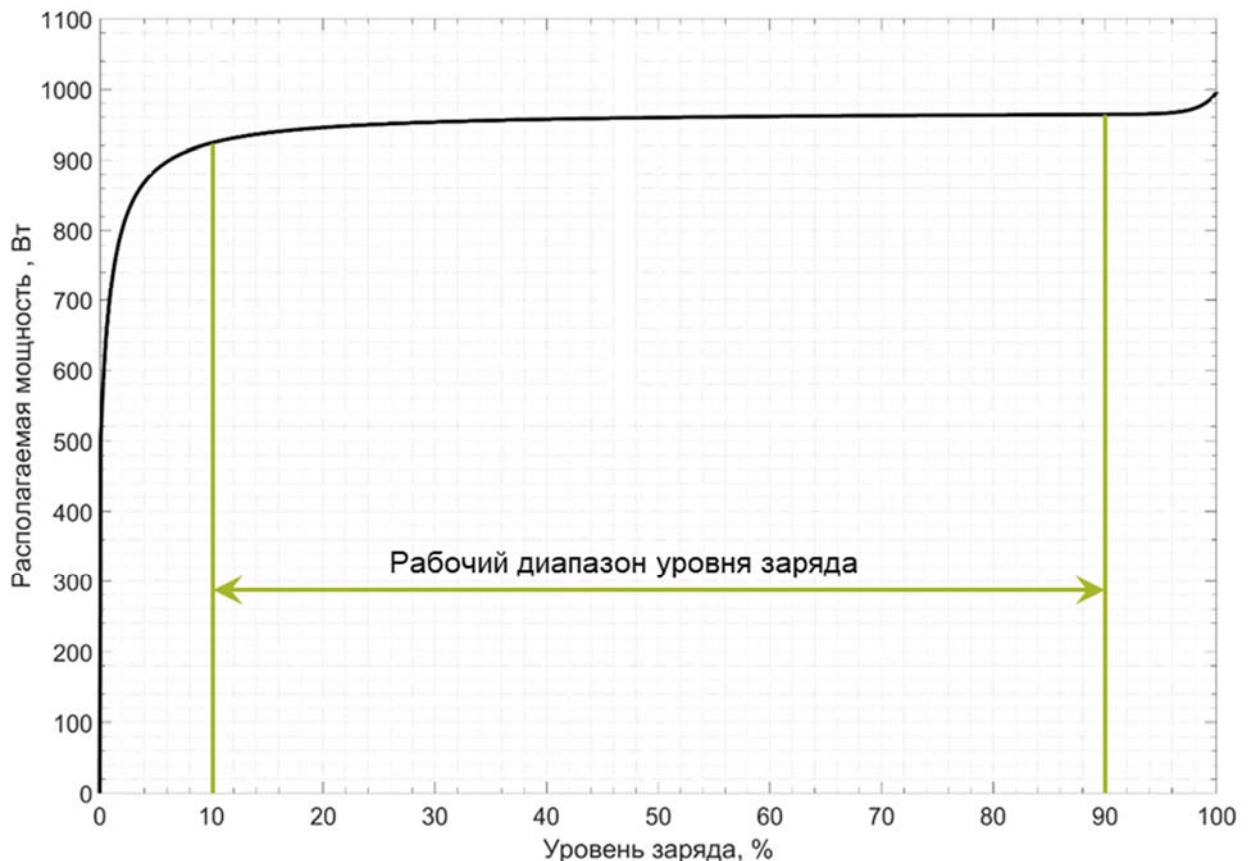


Рисунок 2.4 – Зависимость располагаемой мощности единичного аккумулятора ЛИА GBS 100 Ah от степени заряда

Из этой зависимости следует, что в допустимом диапазоне изменения степени заряда располагаемая мощность меняется незначительно и практически линейно. При этом минимальная располагаемая мощность при $k_3 = 10\%$ равна 1019

Вт. Максимальная располагаемая мощность при $k_3 = 90 \%$ равна 1044 Вт. Максимальная располагаемая мощность модуля больше минимальной на 2,4 %.

2.4 Математическая модель системы накопления энергии для расчёта режимов и электромеханических переходных процессов в энергосистеме

На основе требований, изложенных в параграфе 2.2, разработана математическая модель СНЭ для расчета режимов и электромеханических переходных процессов.

На основании изложенных требований к математической модели системы накопления электрической энергии предлагается математическая модель СНЭ. Общая структурная схема разработанной модели приведена на рисунке 2.5.

Модель построена по модульному принципу. Т.е. каждый элемент модели СНЭ по необходимости может быть изменен, удален или добавлен новый в зависимости от решаемых задач. Модель включает в себя основные подсистемы СНЭ, которые влияют на энергообмен в точке подключения к сети. Вспомогательные подсистемы, такие как охранно-пожарная сигнализация, системы отопления, кондиционирования, вентиляции, системы учета, контроля сбора данных, в модели не учитывались. Каждый элемент модели представлен уравнениями или математической логикой, которые формируют общую модель СНЭ.

Взаимодействие модели СНЭ с другими моделями осуществляется через одну точку входа и одну точку выхода. Точка входа модели СНЭ: сигнал от системы управления (СУ) СНЭ. Сигнал содержит управляющие воздействия, которое должно отработать СНЭ. Точка выхода модели СНЭ: точка подключения СНЭ к сети. В этой точке происходит управляемый энергообмен между СНЭ и сетью.

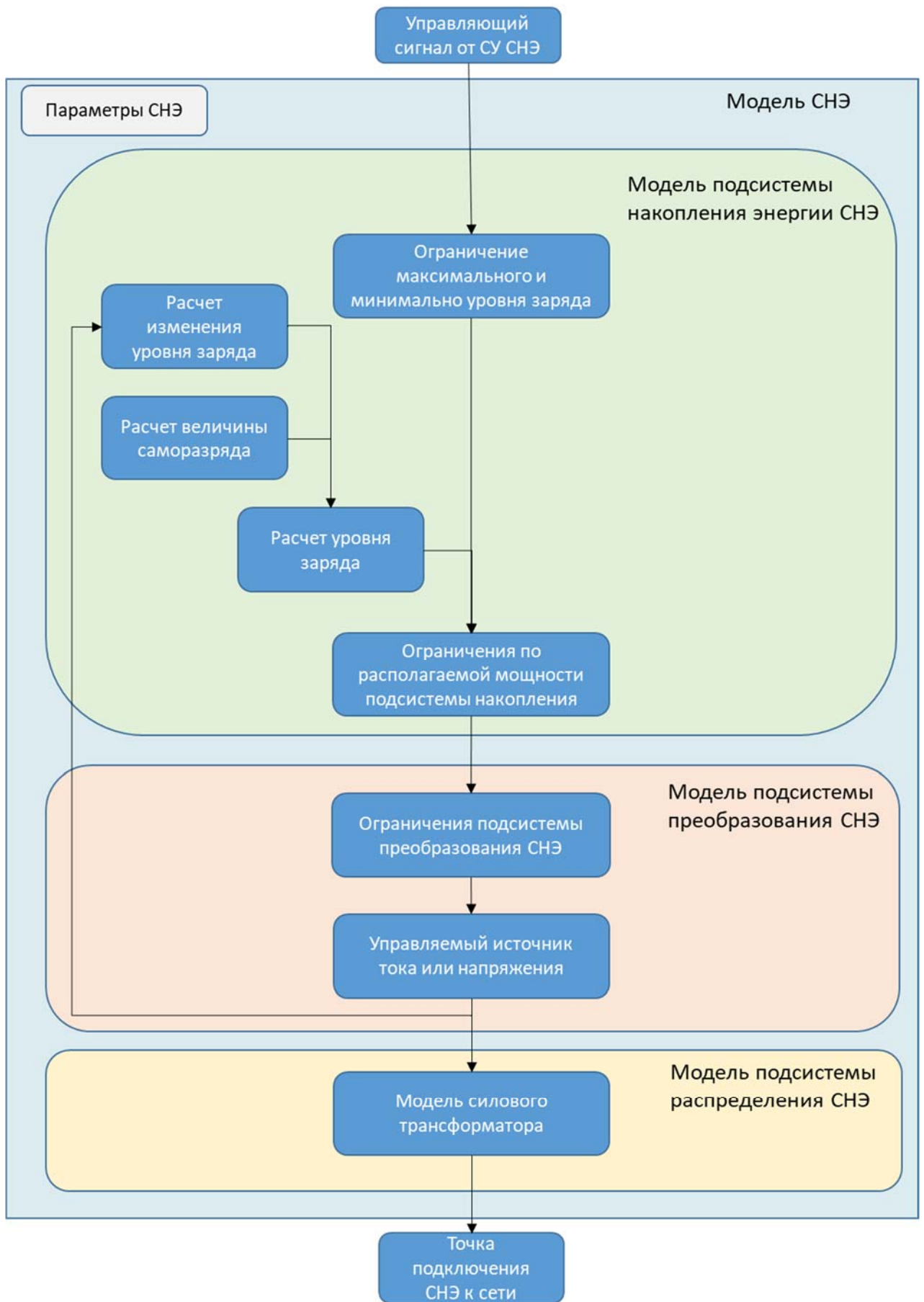


Рисунок 2.5 – Общая структурная схема математической модели СНЭ

Рассматриваемая структурная схема укрупненно иллюстрирует системы и подсистемы в математической модели СНЭ и взаимосвязи между ее элементами:

Параметры СНЭ – блок параметров, который содержит информацию об основных параметрах СНЭ, необходимых для расчета электромеханических переходных процессов и установившихся режимов энергосистем с участием СНЭ. Блок «Параметры СНЭ» содержит необходимую информацию о параметрах всех подсистем СНЭ. К нему в процессе расчёта обращаются остальные подсистемы математико-алгоритмической модели СНЭ-

СУ СНЭ – система управления СНЭ. Содержит алгоритмы управления активной и реактивной мощностью СНЭ, которые позволяют реализовывать основной функционал СНЭ. Например, регулирование частоты в энергосистеме, демпфирование нерегулярных колебаний, демпфирование низкочастотных колебаний мощности, согласование нагрузки потребителя и генерируемой мощности возобновляемых источников энергии (ВИЭ), ограничение минимальной и максимальной мощности генераторного агрегата и т.п. Количество, назначение и содержание алгоритмов определяется пользователем. Пользователь имеет возможность заложить в систему управления любой алгоритм управления СНЭ в функции любых параметров энергосистемы в любой её точке, времени или положения коммутационной аппаратуры.

Блок ограничения минимального и максимального уровня заряда СНЭ – ограничивает максимальный и минимальный уровень заряда подсистемы накопления СНЭ. Необходим для имитации технологических и технических ограничений работы подсистемы накопления СНЭ.

Блок ограничения по располагаемой мощности подсистемы накопления СНЭ – ограничивает выдаваемую и потребляемую мощность подсистемы накопления энергии СНЭ. Характеристики располагаемой мощности подсистемы накопления энергии зависят от уровня заряда подсистемы накопления, типа элементов (литий-ионные аккумуляторы разных типов, суперконденсаторы т.п.), а также рабочего диапазона напряжений двунаправленного преобразователя на стороне постоянного тока.

Блок расчета изменения запасенной энергии – непрерывно рассчитывает изменение уровня заряда подсистемы накопления СНЭ, используя информацию о выданной/потреблённой энергии СНЭ, учитывает коэффициенты полезного действия каждого элемента СНЭ.

Блок расчета саморазряда – непрерывно рассчитывает величину саморазряда подсистемы накопления СНЭ. Необходим для учёта эффекта саморазряда накопителя энергии.

Блок расчета уровня заряда – непрерывно на основе информации от блоков «Расчет изменения уровня заряда» и «Расчет величины саморазряда» рассчитывает величину уровня заряда подсистемы накопления СНЭ.

Блок ограничения в подсистеме преобразования СНЭ – учитывает ограничения, обусловленные работой двунаправленного AC/DC преобразователя. Ограничивает величину выдаваемой/потребляемой мощности СНЭ, основываясь на значении величины номинальной полной мощности двунаправленного AC/DC преобразователя. Учитывает задержку по времени, которая обусловлена работой силовых IGBT-транзисторов и СУ СНЭ. Для современных СНЭ эта задержка (время отклика) не превышает 5 мс.

Управляемый источник тока или напряжения – осуществляет выдачу или потребление мощности в точке подключения СНЭ к внешней сети. Управление энергообменом с системой производится СУ СНЭ с учётом ограничений, накладываемых всеми другими подсистемами (подсистема накопления, подсистема преобразования). Моделируется источником тока или напряжения в зависимости от алгоритма управления СНЭ и решаемой СНЭ задачей.

Силовой согласующий трансформатор – преобразует напряжение на стороне переменного тока двунаправленного AC/DC преобразователя до уровня, необходимого для работы с внешней сетью. Служит для согласования уровней напряжений.

Внешняя сеть – моделирует энергосистему, к которой подключена СНЭ. В состав энергосистемы могут входить: линии, нагрузки, трансформаторы, генерирующие агрегаты разных типов. Внешняя сеть не входит в модель СНЭ.

Ниже приведено подробное описание блоков и подсистем модели СНЭ.

2.4.1 Блок «Параметры СНЭ»

Блок взаимодействует со всеми подсистемами модели СНЭ. В блоке хранится информация обо всех основных параметрах СНЭ, которые используются при расчёте математической модели СНЭ.

Вынос блока с параметрами математической модели в отдельную подсистему позволяет сгруппировать все варьируемые параметры математической модели в единое информационное пространство. Такое решение позволяет производить более удобное оперирование математической моделью СНЭ при различных вариациях параметров СНЭ при решении конкретных задач.

Ниже приведены параметры математической модели СНЭ, которые используются при расчете установившихся режимов и электромеханических переходных процессов в энергосистемах, в состав которых входит одна или несколько систем накопления энергии.

Номинальная полная мощность подсистемы преобразования СНЭ, S_H - равна номинальной мощности двунаправленного AC/DC преобразователя. Базовой единицей измерения является $V \cdot A$, но для удобства могут использоваться и другие единицы ($kV \cdot A$, $MV \cdot A$).

Номинальная энергоемкость СНЭ, W_H - значение номинальной энергоемкости подсистемы накопления СНЭ, соответствующее полному заряду подсистемы накопления энергии, при котором дальнейший заряд СНЭ или невозможен физически [22] или превышение этого значения не допускается заводом-изготовителем из-за значительного снижения ресурса и эксплуатационных характеристик элементов накопления энергии. Определяется суммированием номинальных энергоемкостей единичных элементов накопления энергии, входящих в состав подсистемы накопления СНЭ. Базовой единицей измерения является $Dж$, но для удобства могут использоваться и другие единицы ($MDж$, $kВт \cdot ч$, $MВт \cdot ч$).

Номинальная частота СНЭ, f_H - значение частоты сети, для которой СНЭ предназначена. Базовой единицей измерения является **Гц**. Для расчетной модели СНЭ значение может быть равным 50 или 60 Гц. Значение определяется из параметров моделируемой энергосистемы.

Начальный уровень заряда СНЭ, K_{3H} - относительная величина, показывающая отношение запасенной энергии в СНЭ на начальный момент времени расчета переходного процесса к значению номинальной энергоемкости подсистемы накопления СНЭ. Измеряется в **о.е.** или в **%**.

Максимально допустимый уровень заряда СНЭ, K_{3MAX} - значение уровня заряда, при достижении которого прекращается заряд СНЭ, разряд же может начаться в любой момент в штатном режиме. При снижении уровня заряда ниже K_{3MAX} , снимается запрет на заряд и СНЭ может снова продолжить работу в режиме заряда. Таким образом моделируется работа системы управления подсистемы накопления энергии. Система не должна допустить перезаряд аккумулирующего элемента СНЭ во избежание снижения его ресурса. Для СНЭ на базе литий-ионных аккумуляторов, рекомендуется устанавливать это значение, равным 0,9 о.е. Это связано с тем, что при заряде литий-ионных аккумуляторных батарей выше 90% происходит их ускоренная деградация, проявляющаяся в снижении количества допустимых циклов заряд-разряд [23] и увеличении разброса параметров единичных аккумуляторов. Последнее в свою очередь может привести к перезаряду нескольких единичных аккумуляторов, выходу их из работоспособного состояния и выводу из строя всей подсистемы накопления энергии [23]. Для СНЭ на базе суперконденсаторов целесообразно принимать максимально допустимый уровень заряда равным 1,0 о.е. Измеряется в **о.е.** или в **%**.

Минимально допустимый уровень заряда СНЭ, K_{3MIN} - значение уровня заряда, при достижении которого прекращается разряд СНЭ, заряд же может начаться в любой момент в штатном режиме. При повышении уровня заряда выше K_{3MIN} снимается запрет на разряд и СНЭ продолжает работу в штатном режиме. Таким образом моделируется работа системы управления подсистемы накопления энергии. Система не должна допустить разряд аккумулирующего элемента СНЭ

ниже допустимого уровня во избежание снижения его ресурса. Для СНЭ на базе литий-ионных аккумуляторов, рекомендуется устанавливать это значение равным 0,1 о.е. Это связано с тем, что при снижении уровня заряда ниже 10% происходит снижение ресурса аккумуляторов [19]. Для СНЭ на базе суперконденсаторов значение $Kз_{MIN}$ определяется выражением:

$$Kз_{MIN} = \frac{U_{DC\ min}^2}{U_{DC\ max}^2}, \quad (2.7)$$

где $U_{DC\ min}$ – минимальное допустимое рабочее напряжение двунаправленного AC/DC преобразователя в цепи постоянного тока;

$U_{DC\ max}$ – минимальное значение из двух величин:

- максимального напряжения двунаправленного AC/DC преобразователя в цепи постоянного тока;
- номинальное напряжение батареи суперконденсаторов.

Обычно значение минимального допустимого уровня заряда СНЭ на базе суперконденсаторов лежит в диапазоне 0,3 – 0,5 о.е. [18]. Измеряется в о.е. или в %.

Коэффициент саморазряда СНЭ, $K_{ср}$ - параметр, характеризующий величину самопроизвольного снижения уровня заряда СНЭ. Для современных систем накопления энергии на базе суперконденсаторов и аккумуляторных батарей эта величина находится в диапазонах 15 – 25% [24] и 1 – 5 % [19] в месяц соответственно.

Коэффициент полезного действия СНЭ, $\eta_{СНЭ}$: Значение, показывающие эффективность СНЭ в отношении преобразования энергии в одном направлении (выдача или накопление энергии). Коэффициент полезного действия СНЭ определяется выражением:

$$\eta_{СНЭ} = \eta_{\phi} \cdot \eta_{пр} \cdot \eta_{пн} \cdot \eta_{тр}, \quad (2.8)$$

где:

η_{ϕ} – коэффициент полезного действия выходного фильтра двунаправленного AC/DC преобразователя, использующего ШИМ- метод управления. Диапазон

значений коэффициента полезного действия фильтров, используемых в составе современных систем накопления электрической энергии, равен 0,97 – 0,98 о.е [25].

$\eta_{пр}$ – коэффициент полезного действия двунаправленного AC/DC преобразователя. Диапазон значений коэффициента полезного действия двунаправленных AC/DC преобразователей, используемых в составе современных систем накопления электрической энергии равен 0,95 – 0,97 о.е [25].

$\eta_{пн.}$ – коэффициент полезного действия подсистемы накопления системы накопления электрической энергии. По большей части определяется коэффициентом полезного действия используемых в составе СНЭ элементов накопления энергии (химические аккумуляторы, суперконденсаторы). Сопротивлением соединительных кабелей и элементов можно пренебречь. Для современных суперконденсаторов диапазон значений коэффициента полезного действия равен 0,97 – 0,99 о.е [26]. Для современных литий-ионных аккумуляторных батарей, реализованных по технологии литий-железо-фосфат диапазон коэффициентов полезного действия равен 0,98 – 0,99 о.е [27].

$\eta_{тр}$ – коэффициент полезного действия силового трансформатора. Диапазон значений коэффициента полезного действия двунаправленных силовых трансформаторов равен 0,96 – 0,97 о.е.

Таким образом, коэффициент полезного действия СНЭ при преобразовании энергии в одном направлении лежит в диапазоне 0,87 – 0,92 о.е. Измеряется в *о.е.* или в %.

Время реакции (отклика) СНЭ на ступенчатое возмущение, t_p : Отклик СНЭ на единичное ступенчатое возмущение - длительность интервала времени между моментом возникновения возмущения и началом реакции СНЭ на это возмущение. Этот параметр учитывает время реакции следующих подсистем: время реакции СУ СНЭ, время реакции подсистемы накопления энергии (учитывается постоянная времени химических аккумуляторов и суперконденсаторов), время реакции подсистемы преобразования. Для современных СНЭ на базе литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов время реакции

СНЭ на ступенчатое воздействия составляет не более 5 мс [28]. Измеряется в секундах (с) или миллисекундах (мс).

Характеристика располагаемой мощности подсистемы накопления СНЭ, $P_{\text{расп.}} = f(K_3)$: зависимость максимального значения мощности, которую способна потреблять/выдавать СНЭ в режиме заряда/разряда, от уровня заряда. Вид характеристики располагаемой мощности зависит от типа подсистемы накопления энергии (литий-ионные аккумуляторы, суперконденсаторы и т.п.). На рисунках 2.3 и 2.4 (соответственно для литий-ионного аккумулятора и суперконденсатора) приведены примеры характеристик располагаемой мощности подсистем накопления СНЭ для единичных элементов накопления энергии.

2.4.2 Блок «Ограничение минимального и максимального уровня заряда СНЭ»

Блок ограничивает максимальный и минимальный уровень заряда подсистемы накопления СНЭ. Он необходим для моделирования технологических и технических ограничений работы подсистемы накопления СНЭ. Необходимые входные величины и параметры для ограничения максимального и минимального уровня заряда следующие: сигнал управления от СУ СНЭ по активной мощности ($P_{\text{СУ}}$); минимально допустимый уровень заряда СНЭ ($K_{3\text{min}}$), максимально допустимый уровень заряда СНЭ ($K_{3\text{max}}$), текущий уровень заряда СНЭ (K_3)

При достижении уровнем заряда максимально допустимого значения $K_{3\text{max}}$ сигнал СУ СНЭ на потребление активной мощности накопителя приравнивается нулю, что прекращает заряд накопителя, но не запрещает его разряд при подаче соответствующей команды.

Аналогично, при достижении уровнем заряда минимально допустимого значения $K_{3\text{min}}$, сигнал СУ СНЭ на выдачу активной мощности накопителя приравнивается нулю, что прекращает разряд накопителя, но не запрещает его заряд при подаче соответствующей команды.

На рисунке 2.6 приведена блок-схема блока «Ограничение минимального и максимального уровня заряда СНЭ».

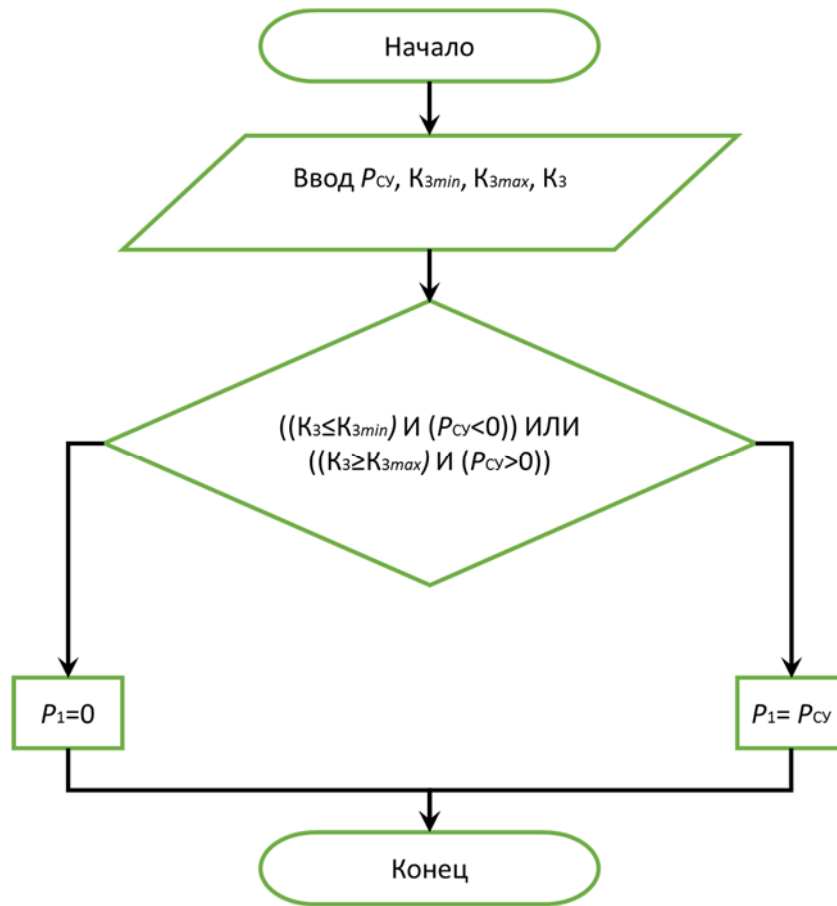


Рисунок 2.6 – Блок-схема алгоритма ограничения максимального и минимального уровня заряда подсистемы накопления СНЭ

2.4.3 Блок «Ограничение по располагаемой мощности подсистемы накопления СНЭ»

Блок «Ограничение по располагаемой мощности подсистемы накопления СНЭ» ограничивает выдаваемую и потребляемую мощность подсистемы накопления энергии. Ограничение производится в соответствии с зависимостью располагаемой мощности подсистемы накопления энергии от уровня заряда $P_{расп.} = f(K_3)$. Примеры характеристик располагаемой мощности приведены на рисунках 2.3 и 2.4.

Для работы алгоритма также необходимы следующие данные: текущий уровень заряда СНЭ (K_3), значение мощности сформированное алгоритмом ограничения максимального и минимального уровня заряда подсистемы накопления СНЭ (P_1).

При работе алгоритма сравнивается значение модуля требуемой мощности (P_1) со значением располагаемой мощности, которое соответствует текущему уровню заряда СНЭ ($P_{расп.}(K_3)$). Если значение требуемой активной мощности по модулю меньше, чем располагаемая мощность, то требуемая мощность не ограничивается. Если же требуемая активная мощность превышает располагаемую, то выдаваемая/потребляемая мощность подсистемы накопления энергии ограничивается значением располагаемой мощности при текущем уровне заряда.

На рисунке 2.7 приведена блок-схема алгоритма ограничения располагаемой мощности подсистемы накопления СНЭ.

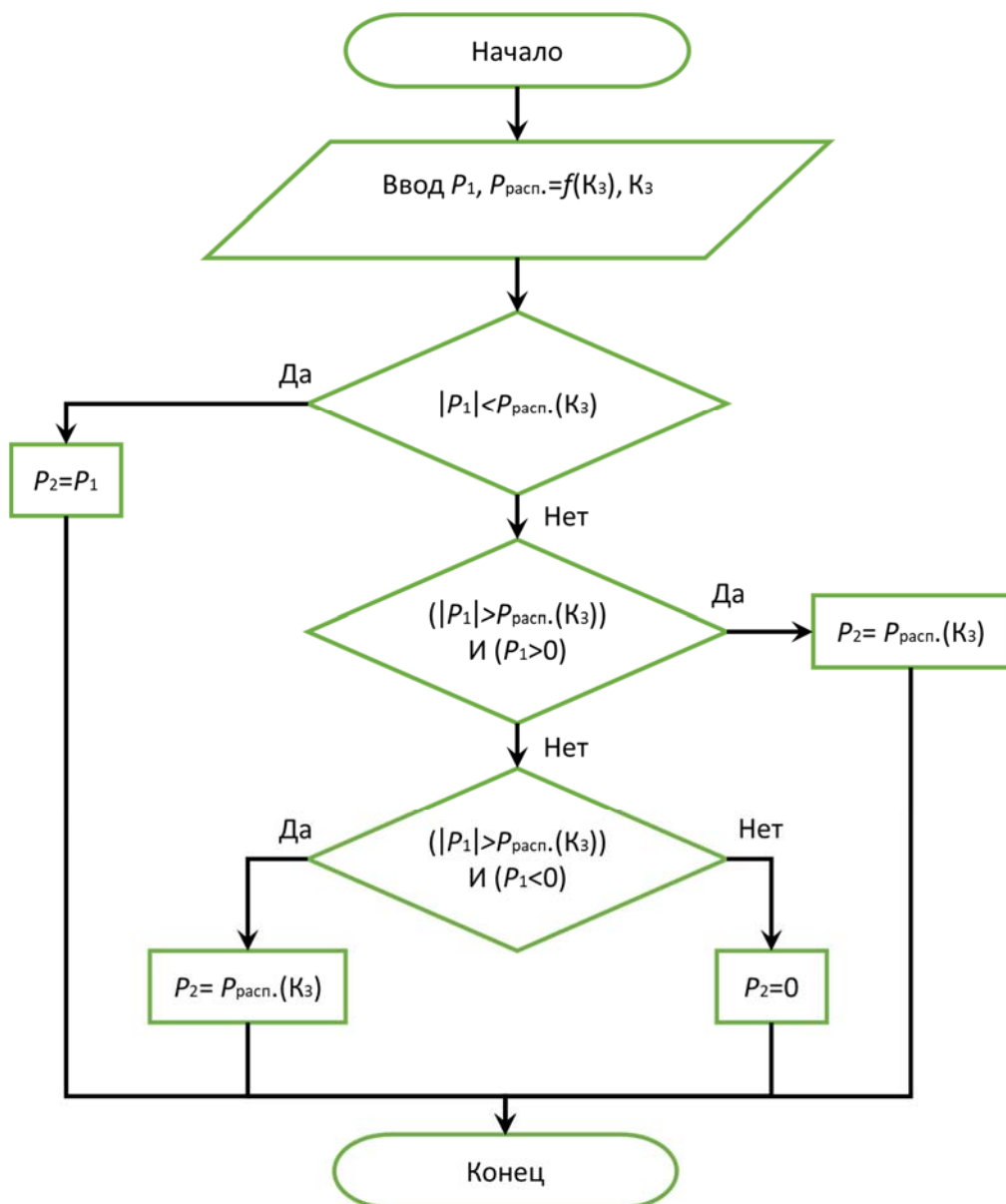


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритма ограничения располагаемой мощности подсистемы накопления СНЭ

2.4.4 Блок «Расчет уровня заряда СНЭ»

Для обеспечения корректного моделирования процессов в системе накопления электрической энергии математическая модель СНЭ должна учитывать непрерывно изменяющийся в результате энергообмена и саморазряда уровень заряда накопителя энергии.

При определении уровня заряда производится: расчет изменения запасенной энергии в системе накопления энергии, расчет величины саморазряда, расчет текущего уровня заряда.

Блоки расчета изменения запасенной энергии и величины саморазряда независимы друг от друга, результаты расчёта по ним используются при расчете текущего уровня заряда.

Для расчета величины изменения запасенной энергии используются следующие величины: выдаваемая/потребляемая активная мощность СНЭ в точке подключения ($P_{\text{СНЭ}}$), которая измеряется в точке подключения СНЭ к энергосистеме; коэффициент полезного действия СНЭ ($\eta_{\text{СНЭ}}$).

В первую очередь рассчитывается величина активной мощности на зажимах подсистемы накопления ($P_{\text{ПН}}$), которая должна быть учтена при расчёте отданной и запасенной энергии. Мощность в точке подключения СНЭ ($P_{\text{СНЭ}}$) характеризует величину мощностьэнергообмена между СНЭ и энергосистемой. При этом значения потреблённой и выданной энергии СНЭ отличаются из-за потерь в подсистемах преобразования, накопления, распределения энергии и саморазряда.

Коэффициент полезного действия СНЭ учитывает потери мощности в подсистемах системы накопления электрической энергии. Расчет мощности на зажимах подсистемы накопления ($P_{\text{ПН}}$) для определения уровня заряда зависит от знака активной мощности СНЭ. Если СНЭ выдает мощность, то есть $P_{\text{СНЭ}} > 0$, то для расчета изменения запасенной энергии необходимо увеличить мощность СНЭ на величину потерь в подсистемах СНЭ. Обратная ситуация возникает, когда СНЭ потребляет мощность ($P_{\text{СНЭ}} < 0$). Блок-схема расчета мощности для определения уровня заряда показана на рисунке 2.8.

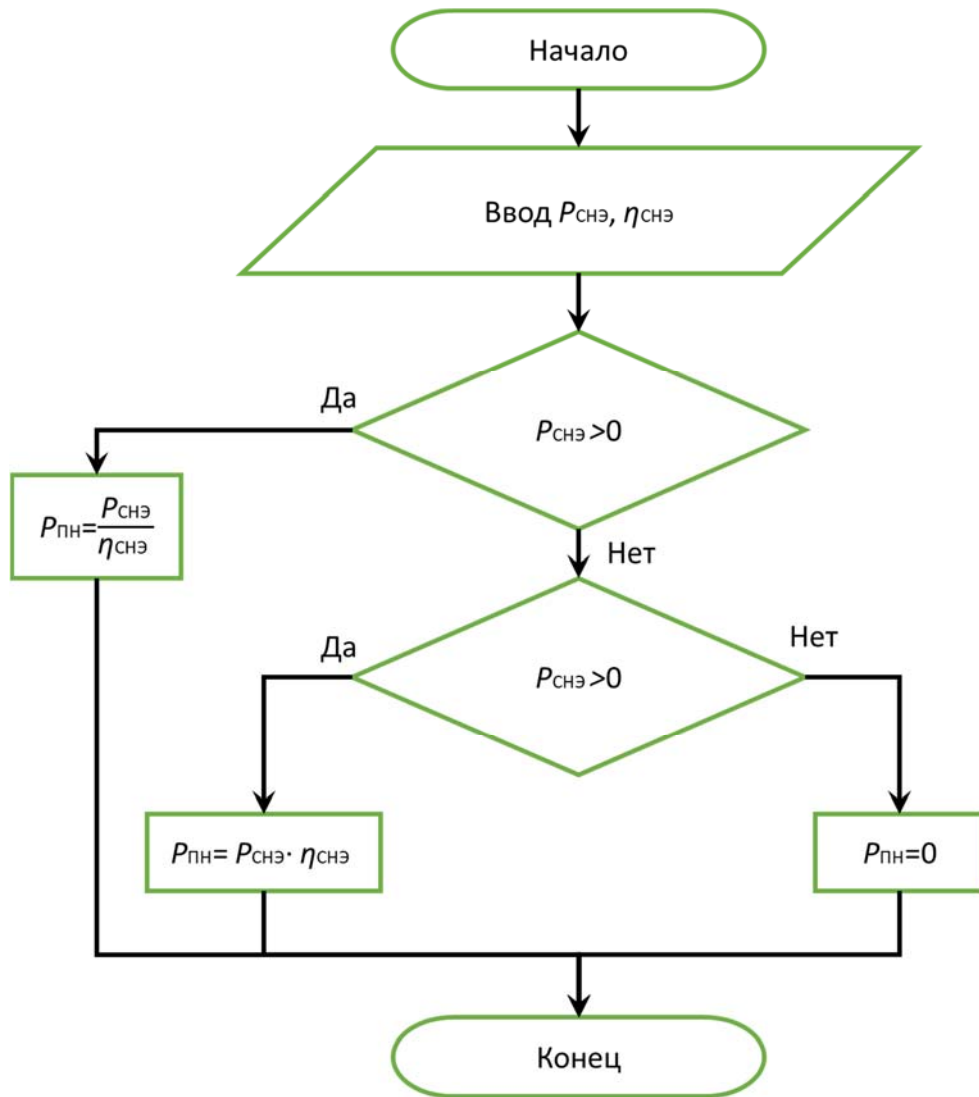


Рисунок 2.8 – Блок схема алгоритма расчета мощности на зажимах подсистемы накопления

Для расчета изменения запасённой энергии в процессе расчёта необходимо непрерывно вычислять интеграл мощности по времени:

$$\int_0^{\infty} P_{\text{ПН}} dt = \Delta W_{\text{СНЭ}} \quad (2.9)$$

Передаточная функция для расчета изменения запасенной энергии записывается следующим образом:

$$W_{\Delta\text{СНЭ}}(p) = P_{\text{ПН}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{3600}, \quad (2.10)$$

где:

$P_{\text{ПН}}$ – активная мощность на зажимах подсистемы накопления. По умолчанию задаётся в **МВт**;

$\frac{1}{P}$ – идеальное интегрирующее звено. После интегрирования сигнала P_{SOC} получаем сигнал изменения энергии в $MВт\cdot c$;

$\frac{1}{3600}$ – коэффициент перевода сигнала изменения запасенной энергии из $MВт\cdot c$ в $MВт\cdot ч$.

Процесс саморазряда присущ всем типам накопителей энергии. Для современных накопителей энергии на базе литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов величина саморазряда относительно мала. Для суперконденсаторов она составляет 15–25 % в месяц [24], для литий-ионных аккумуляторов 1–5 % в месяц [19]. Характер саморазряда имеет нелинейную зависимость (см. рисунки 2.9 и 2.10).

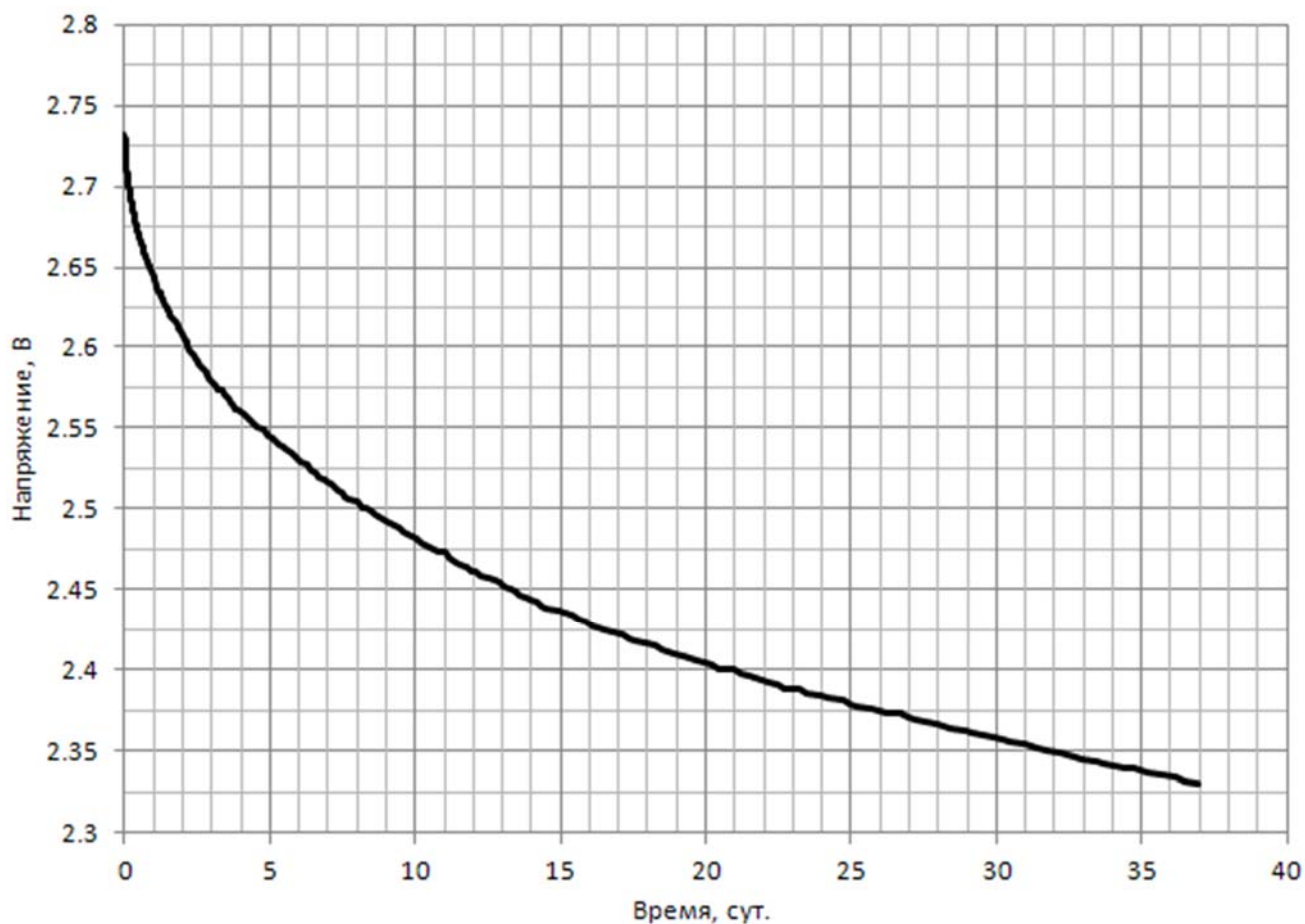


Рисунок 2.9 – Зависимость напряжения СК NESSCAP 1200 Ф от времени при саморазряде [29]

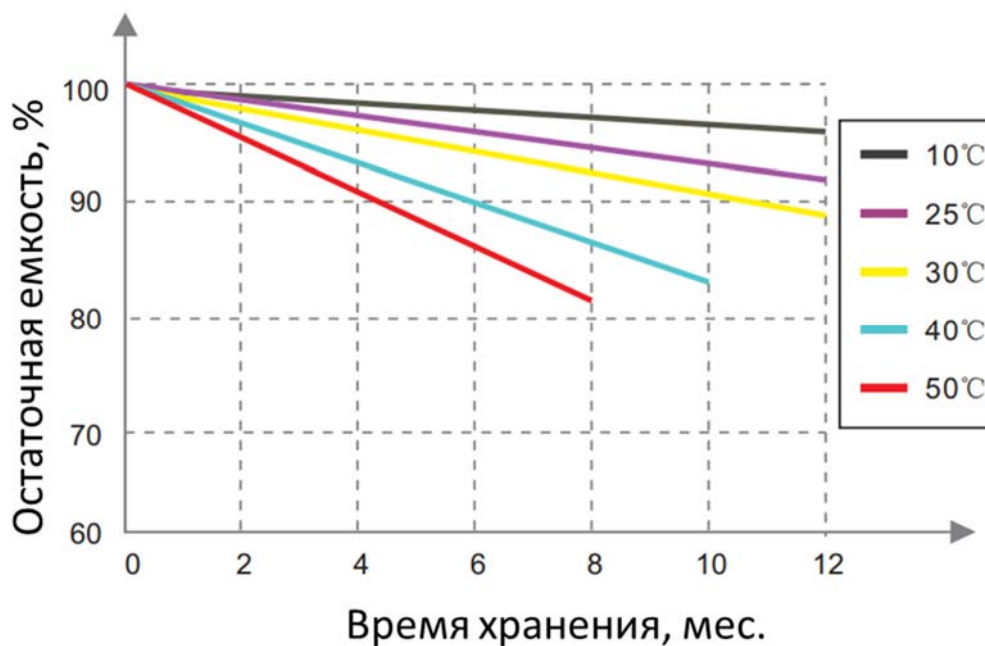


Рисунок 2.10 – Зависимость остаточного заряда ЛИА LiFePO₄ 12,8 В 32 А·ч при различной температуре хранения [30]

По причине малой величины саморазряда, а также малому, по отношению к одному календарному месяцу, времени расчетов электромеханических переходных процессов принята линейная характеристика саморазряда подсистемы накопления СНЭ. Передаточная функция для расчета величины саморазряда имеет вид:

$$W_{\text{CP}}(p) = K_{\text{CP}} \cdot \frac{1}{30 \cdot 24 \cdot 3600} \cdot \frac{1}{100} \cdot W_{\text{H}} \cdot \frac{1}{p}, \quad (2.11)$$

где:

K_{CP} – величина саморазряда подсистемы накопления энергии. По умолчанию задается в *%/мес.*

$\frac{1}{30 \cdot 24 \cdot 3600}$ – коэффициент переводящий величину саморазряда подсистемы накопления энергии СНЭ из *%/мес* в *%/с.*

$\frac{1}{100}$ – коэффициент переводящий величину саморазряда из процентов в относительные единицы, то есть из *%/с* в *о.е./с.*

W_{H} – номинальная энергоемкость подсистемы накопления СНЭ, значение полной энергоемкости подсистемы накопления СНЭ. По умолчанию задается в *МВт·ч.* Необходима для расчета величины саморазряда в именованных значениях (*МВт·ч/с*).

$\frac{1}{p}$ – идеальное интегрирующее звено. Интегрирует заданную величину саморазряда СНЭ, которая соответствует потерянной энергии на саморазряд в ***МВт·ч*** в каждый момент времени.

Количество запасенной энергии в подсистеме накопления СНЭ меняется по двум причинам:

- Выдача/потребление энергии в процессе энергообмена с системой.
- Потери запасенной энергии в результате саморазряда.

При учете двух этих факторов передаточная функция, отражающая процесс изменения запасенной энергии в подсистеме накопления будет иметь следующий вид:

$$W_{\text{зап.СНЭ}}(p) = W_{\text{Н}} \cdot K_{\text{ЗН}} - W_{\text{СР}}(p) - W_{\Delta\text{СНЭ}}(p), \quad (2.12)$$

где - $K_{\text{ЗН}}$ – начальный (на момент начала расчёта) уровень заряда СНЭ в ***о.е.***,

$W_{\text{Н}} \cdot K_{\text{ЗН}}$ – количество запасенной энергии в СНЭ на начальный момент переходного процесса в абсолютных величинах (***МВт·ч***),

$W_{\text{СР}}(p)$ – передаточная функция, отражающая динамику процесса саморазряда СНЭ,

$W_{\Delta\text{СНЭ}}(p)$ – передаточная функция, отражающая динамику изменения запасенной энергии в процессе энергообмена.

Передаточная функция, выраженная в %, принимает вид:

$$W_{\text{СНЭ}\%}(p) = W_{\text{зап.СНЭ}}(p) \cdot \frac{1}{W_{\text{Н}}} \cdot 100, \quad (2.13)$$

где:

$\frac{1}{W_{\text{Н}}}$ – коэффициент обеспечивающий перевод значения запасенной энергии в отношение, показывающее количество запасенной энергии к номинальной энергоёмкости СНЭ в ***о.е.***

100 – коэффициент перевода уровня заряда в проценты (%).

2.4.5 Ограничения подсистемы преобразования энергии СНЭ

Основной элемент подсистемы преобразования – двунаправленный (реверсивный) АС/DC преобразователь. При моделировании электромеханических

переходных процессов основное ограничение, которое он накладывает - это ограничение по длительно-допустимому току (полной мощности) преобразователя.

Важно, чтобы в ходе эксплуатации полная мощность, проходящая через AC/DC преобразователь, не превышала номинальное значение. Таким образом, полная мощность через преобразователь должна быть не больше номинального значения полной мощности преобразователя.

Для обеспечения защиты от перегрузки преобразователя необходимо сформировать алгоритм, который будет ограничивать желаемую полную мощность.

Для алгоритма ограничения полной мощности СНЭ необходимы следующие параметры:

P_2 – управляющий сигнал активной мощности, сформированный СУ СНЭ. При этом сигнал учитывает ограничения подсистемы накопления энергии СНЭ.

$Q_{СУ}$ – управляющий сигнал реактивной мощности СНЭ, сформированный СУ СНЭ.

S_H – номинальная полная мощность подсистемы преобразования СНЭ.

При ограничении полной мощности необходимо учитывать соотношение активной и реактивной мощностей. Существует несколько подходов к ограничению полной мощности:

- Ограничение полной мощности при условии сохранения коэффициента мощности (вариант 1).
- Ограничение полной мощности, с приоритетом активной мощности, т.е. реактивная мощность выдается/потребляется по остаточному принципу (вариант 2).
- Ограничение полной мощности, с приоритетом реактивной мощности, т.е. активная мощность выдается/потребляется по остаточному принципу (вариант 3).

На рисунке 2.11 приведена блок-схема алгоритма ограничения полной мощности для различных вариантов ограничения.

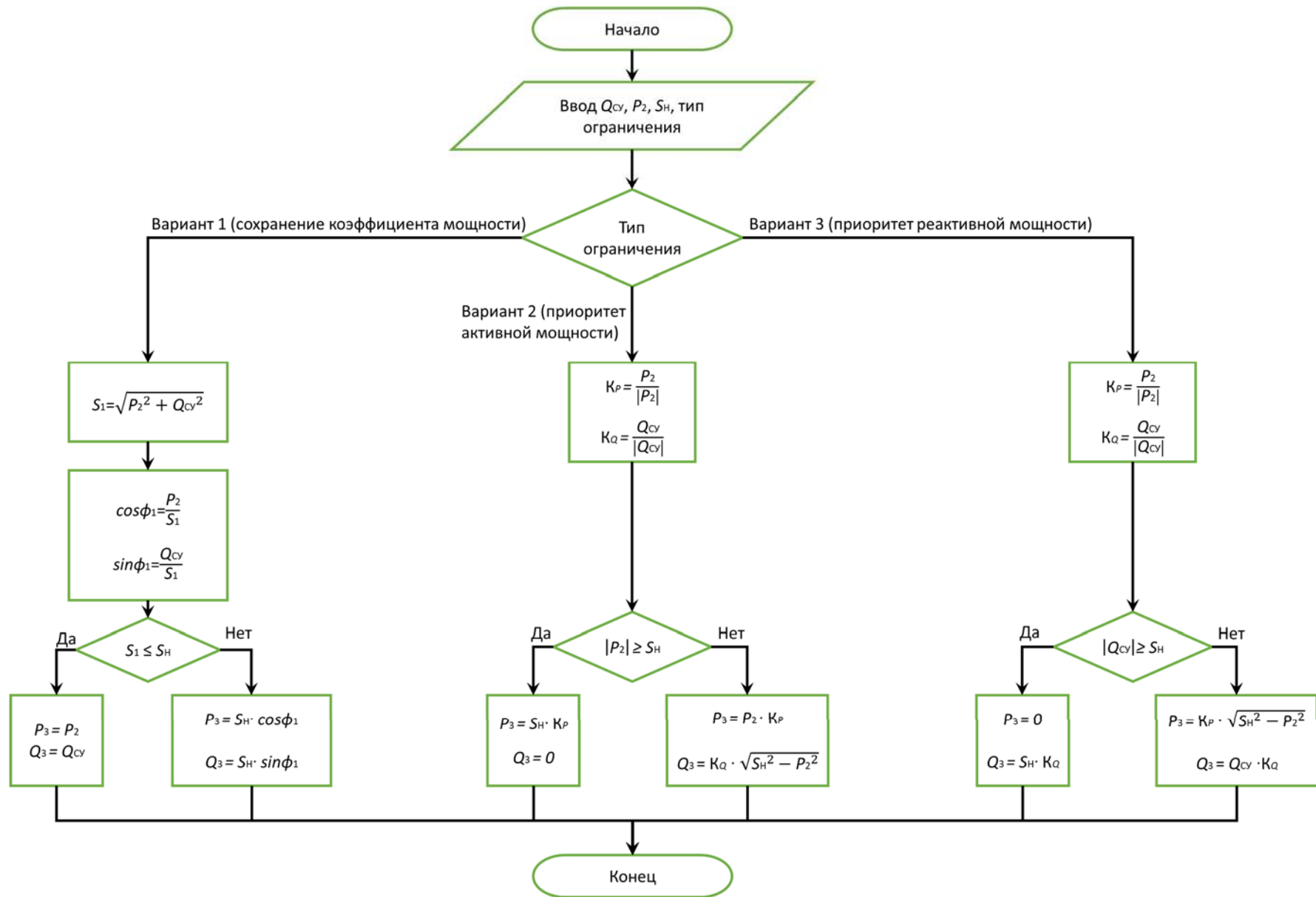


Рисунок 2.11 – Блок-схема ограничения полной мощности подсистемы преобразования СНЭ

При расчете электромеханических переходных процессов необходимо учитывать время отклика СНЭ, которое рассчитывается по выражению:

$$T_{\text{СНЭ}} = T_{\text{СУ}} + T_{\text{IGBT}} + T_{\text{ак.}}, \quad (2.14)$$

где – $T_{\text{СУ}}$ – время реакции системы управления СНЭ.

T_{IGBT} – время реакции двунаправленного АС/DC преобразователя.

$T_{\text{ак.}}$ – время реакции аккумуляторов СНЭ.

Время отклика СНЭ $T_{\text{СНЭ}}$ составляет 0,005 – 0,02 секунды [28].

Учитывая время реакции СНЭ, получим передаточные функции, реализующие время реакции СНЭ на ступенчатое возмущение:

$$P_{\text{СНЭ}} = P_3 \cdot \frac{1}{1+T_{\text{СНЭ}}p} \quad (2.15)$$

$$Q_{\text{СНЭ}} = Q_3 \cdot \frac{1}{1+T_{\text{СНЭ}}p} \quad (2.16)$$

где – P_3 – сигнал управления активной мощностью СНЭ, сформированный СУ СНЭ и учитывающий ограничения подсистемы накопления и преобразования энергии.

Q_3 – сигнал управления реактивной мощностью СНЭ, сформированный СУ СНЭ и учитывающий ограничения подсистемы накопления и преобразования энергии.

Сформированные сигналы управления СНЭ активной и реактивной мощностью (P_3 и Q_3) учитывают ряд особенностей и ограничений, которые накладывают подсистемы СНЭ:

- ограничения максимального и минимального уровня заряда;
- ограничения по располагаемой мощности подсистемы накопления СНЭ;
- непрерывно изменяющийся во времени уровень заряда СНЭ;
- саморазряд СНЭ;
- коэффициенты полезного действия подсистем СНЭ;
- ограничения, накладываемые подсистемой преобразования СНЭ;
- время реакции СНЭ на ступенчатое возмущение.

Следующий этап реализации математической модели СНЭ в составе энергосистемы – это преобразование сигналов управления активной и реактивной мощностью СНЭ, которые учитывают особенности и внешние характеристики СНЭ, в модели источников токов или напряжений, пригодных для расчета электромеханических переходных процессов.

Для реализации этого, используется модель управляемого источника тока или напряжения. Такое решение позволяет легко адаптировать и интегрировать математико-алгоритмическую модель СНЭ в промышленные программно-вычислительные комплексы по расчету установившихся режимов и электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах. Примерами, таких, расчетных комплексов могут служить: Matlab\Simulink, DigSilent, Eurostag и др.

2.4.6 Модель подсистемы распределения энергии СНЭ

Основной элемент подсистемы распределения энергии СНЭ – силовой трехфазный трансформатор. Его основная задача – согласование уровней напряжений между выходным напряжением на стороне переменного тока AC/DC преобразователя (обычно 0,4 кВ) и номинальным напряжением в точке подключения СНЭ к сети.

В качестве модели силового трансформатора используется математическая модель [31]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_{\sigma 1} \dot{I}_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - Z'_{\sigma 2} \dot{I}'_2; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0; \\ \dot{E}_1 = -Z_M \dot{I}_0 \end{cases} \quad (2.17)$$

где:

$$Z_{\sigma 1} = r_1 + jx_{\sigma 1}; Z'_{\sigma 2} = r'_2 + jx'_{\sigma 2}$$

$Z_M = r_M + jx_M$ -индуктивное сопротивление первичной обмотки;

r_M -активное сопротивление ветви намагничивания, которое обусловлено магнитными потерями в магнитопроводе;

x_M -индуктивное сопротивление ветви намагничивания

$x_{\sigma 1}, x'_{\sigma 2}$ -индуктивные сопротивления, которые учитывают магнитные потоки рассеяния;

r_1, r'_2 -активные сопротивления, которые определяют электрические потери в обмотках

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z_{\text{ЭКВ}} = Z_{\sigma 1} + \frac{Z_M(Z'_{\sigma 2} + Z'_{\text{НГ}})}{Z'_{\sigma 2} + Z'_{\text{НГ}} + Z_M} \quad (2.18)$$

где $Z_{\text{ЭКВ}}$ -эквивалентное входное сопротивление электрической цепи.

T-образная схема замещения трансформатора имеет вид, представленный на рисунке 2.12.

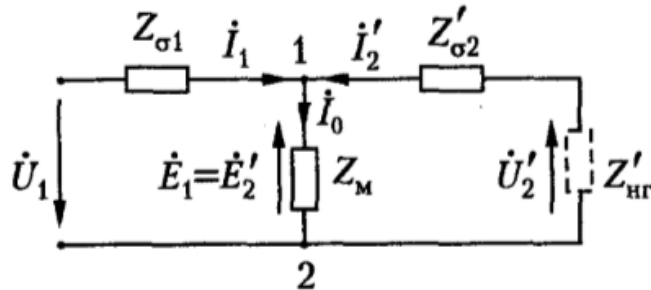


Рисунок 2.12 – T-образная схема замещения трансформатора

Таким образом, при моделировании подсистемы распределения СНЭ использована типовая модель силового трансформатора, применяемого при моделировании энергосистем.

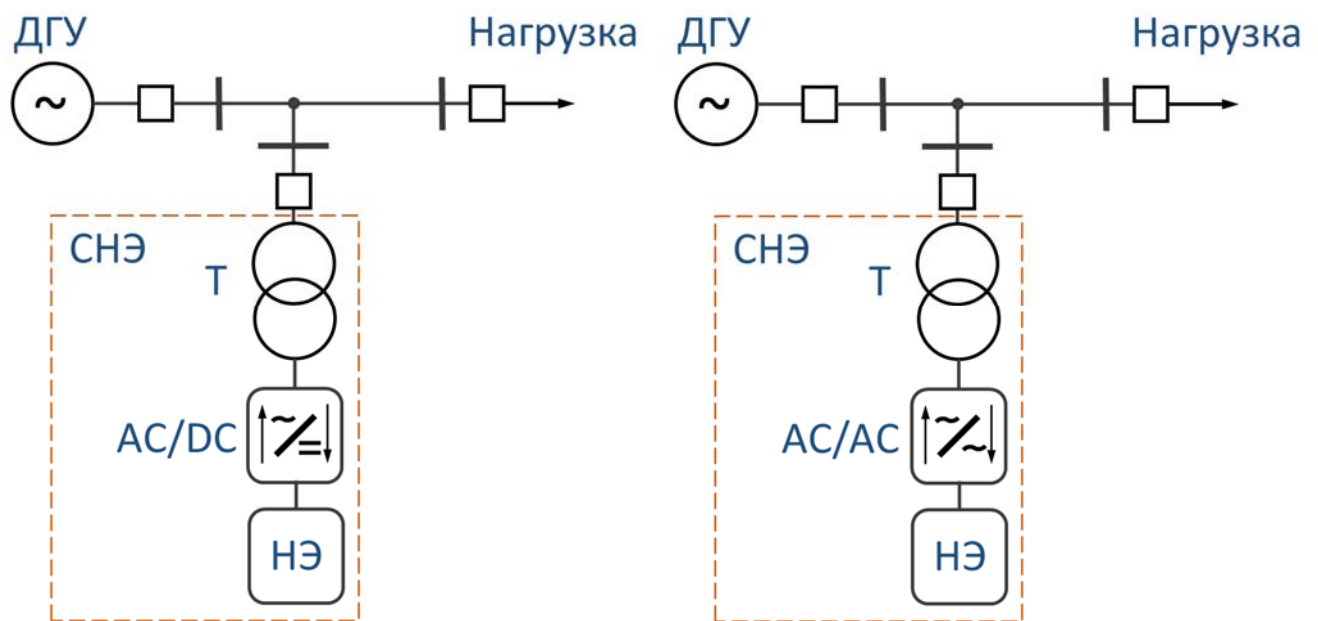
2.5 Примеры применения математической модели СНЭ

Одна из важных характеристик разработанной математической модели СНЭ - возможность использовать её для различных типов накопителей энергии (ЛИА, суперконденсаторы, электромеханические накопители и др.).

Для иллюстрации возможностей математической модели выполнены расчёты переходных процессов в автономной электроэнергетической системе подъёмного крана при использовании трёх различных типов СНЭ. Расчетная схема показана на рисунке 2.13. В составе энергосистемы имеются: источник электроэнергии – ДГУ; нагрузка – электроприводы механизмов подъёмного крана

(характер нагрузки – циклический, резко переменный); на шины ДГУ подключена СНЭ.

На рисунках 2.15, 2.17, 2.19 (верхняя диаграмма) приведён характерный фрагмент нагрузочной диаграммы автономной электростанции в нормальном технологическом режиме работы – при перегрузке сыпучего груза [32]. При номинальной мощности электростанции – 300 кВт, средняя мощность нагрузки составляет 66 кВт (Киум = 22%).



ДГУ – дизель-генераторная установка, СНЭ – система накопления энергии, Т – согласующий трансформатор, AC/DC – двунаправленный (реверсивный) преобразователь для СНЭ на базе ЛИАБ и суперконденсатора или AC/AC – двунаправленный (реверсивный) преобразователь частоты в случае применения электрохимического накопителя энергии, НЭ – накопитель энергии (ЛИАБ, суперконденсаторы или электрохимический)

Рисунок 2.13 – Расчетная схема

Система управления СНЭ настроена на одновременное выполнение двух функций (алгоритмов управления):

1. Ограничение максимальной и минимальной мощности ДГУ (работа ДГУ в заданном коридоре мощности 64 – 86.6 кВт).
2. Демпфирование резонансных частот графика нагрузки из диапазона НЧК (алгоритм идентифицирует гармоники мощности с частотами 0,3 – 3 Гц, затем

выдает управляющий сигнал СНЭ для компенсации гармоник мощности в противофазе).

Возможности модели СНЭ продемонстрированы на тестовой схеме для трех типов накопителей энергии:

- СНЭ на базе литий-ионных аккумуляторов;
- СНЭ на базе суперконденсаторов;
- СНЭ на базе электромеханического накопителя энергии.

2.5.1 СНЭ на базе литий-ионных аккумуляторов

В расчетной модели использована СНЭ на базе ЛИА GBS 100 Ah с параметрами, показанными в Таблице 2.4, располагаемая мощность СНЭ задается характеристикой, показанной на рисунке 2.14.

Таблица 2.4 – Параметры СНЭ на базе ЛИА GBS 100 Ah

№ п.п.	Параметр	Значение
1	Максимальная мощность, кВт	170
2	Энергоемкость, кВт·ч	50
3	КПД при заряде, о.е.	0,96
4	КПД при разряде, о.е.	0,96
5	Номинальное напряжение СНЭ, кВ	0,4
6	Тип аккумуляторов	Литий-железо-фосфат
7	Номинальная емкость единичного аккумулятора, А·ч	100
8	Номинальное напряжение единичного аккумулятора, В	3,2
9	Номинальное напряжение аккумуляторной батареи, В	503
10	Номинальный ток аккумулятора, А	300
11	Количество аккумуляторов в СНЭ, шт.	157
12	Тип соединения аккумуляторов в аккумуляторной батарее	Последовательное

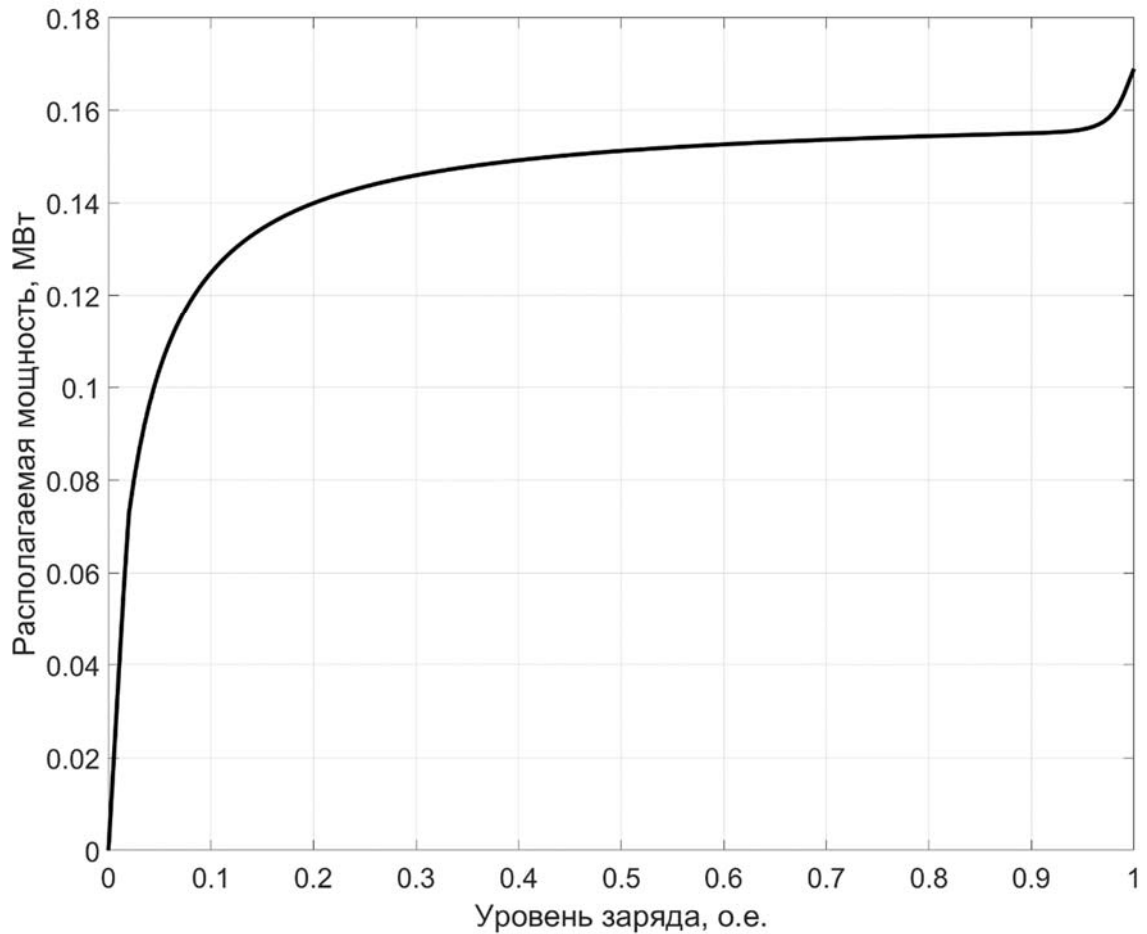
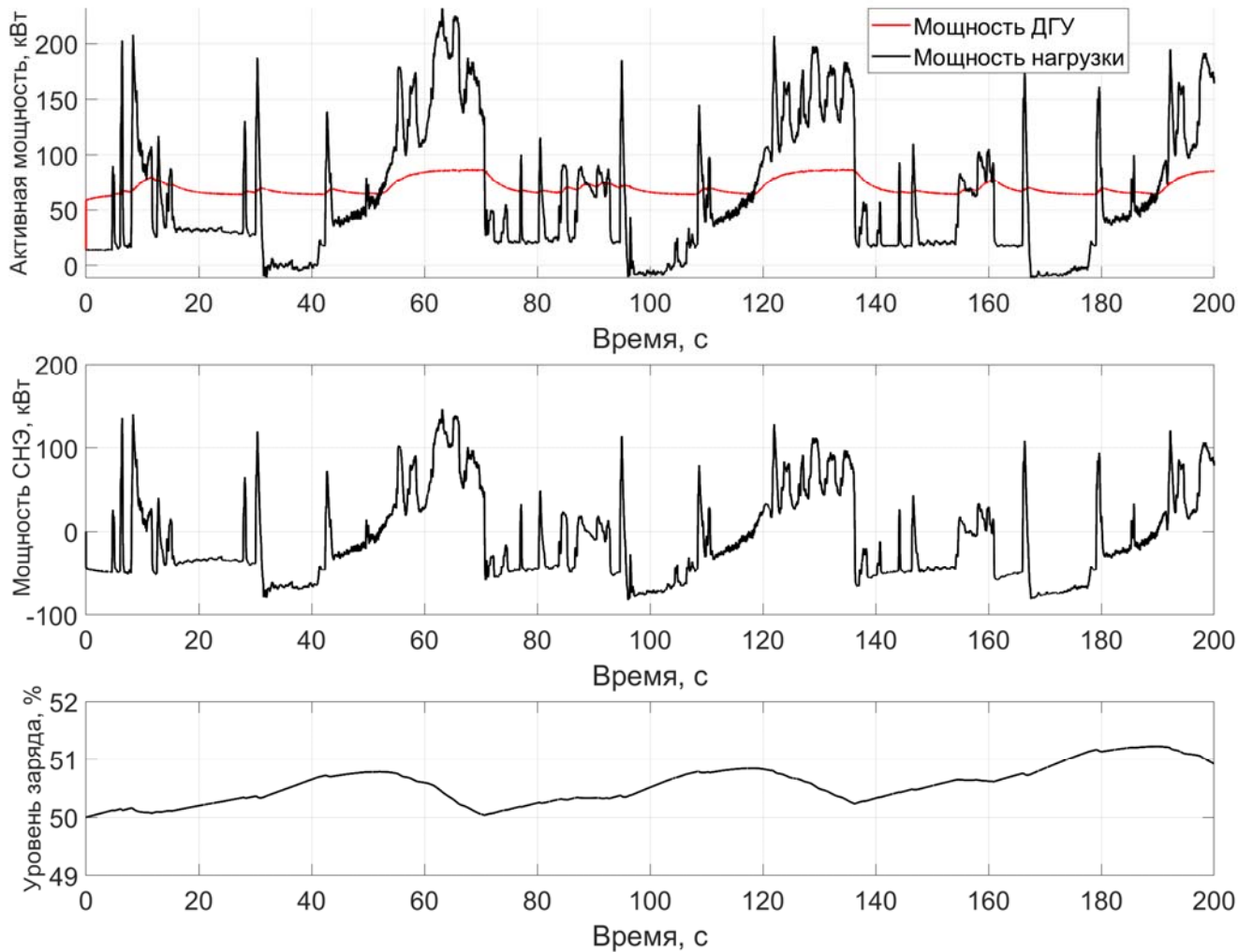


Рисунок 2.14 – Располагаемая мощность СНЭ на базе ЛИА GBS 100 Ah

Зависимость располагаемой мощности рассчитана для СНЭ с параметрами, приведенными в таблице 2.4. Характеристика рассчитана на основе разрядной характеристики ЛИА GBS 100 Ah [17]. Практически на всем рабочем диапазоне уровня заряда ее допустимо заменить линейной зависимостью. Что облегчает разработку и реализацию алгоритмов управления СНЭ.

При моделировании начальный уровень заряда СНЭ принят равным 50%. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.15.



Верхняя диаграмма – мощность нагрузки и мощность ДГУ, средняя диаграмма – мощность СНЭ, нижняя диаграмма - уровень заряда СНЭ

Рисунок 2.15 – Переходные процессы в автономной энергосистеме подъёмного крана со СНЭ на базе ЛИА (см. параметры в таблице 2.4)

Результаты расчета показывают, что разработанная в диссертации модель накопителя позволяет рассчитывать переходные процессы с использованием СНЭ на базе ЛИА и реализовать любые алгоритмы управления СНЭ в математическую модель. Анализ диаграмм переходных процессов показывает, что СНЭ на базе ЛИА с указанными параметрами справляется с возложенными на нее задачами в полном объеме. Мощность ДГУ находится в заданных пределах мощности. Алгоритм демпфирования резонансных частот нагрузки из диапазона НЧК обеспечивает плавное изменение мощности ДГУ.

2.5.2 СНЭ на базе суперконденсаторов

В расчетной модели использована СНЭ на суперконденсаторах со следующими параметрами (см. таблицу 2.5), при этом располагаемая мощность СНЭ задается характеристикой, показанной на рисунке 2.16.

Параметры СНЭ на суперконденсаторах подобраны таким образом, чтобы СНЭ справлялась с возложенными на нее задачами частично. В расчетном примере занижена энергоемкость СНЭ по сравнению с требуемой энергоемкостью для выполнения поставленных перед СНЭ задач. В результате расчета СНЭ должна полностью разрядиться или полностью зарядиться вплоть до прекращения процесса заряда/разряда. Это сделано с целью демонстрации возможностей модели СНЭ при выходе на граничные условия.

Таблица 2.5 – Параметры СНЭ на базе модуля СК МО-150V53F-0 [16]

№ п.п.	Параметр	Значение
1	Максимальная мощность, кВт	135
2	Энергоемкость, кВт·ч	0.828
3	КПД при заряде, о.е.	0.96
4	КПД при разряде, о.е.	0.96
5	Номинальное напряжение СНЭ, кВ	0,4
6	Номинальное напряжение единичного суперконденсатора, В	150
7	Номинальное напряжение СНЭ на стороне DC, В	750
8	Номинальная емкость единичного суперконденсатора, Ф	53
9	Номинальный ток СК, А	300
10	Количество суперконденсаторов в СНЭ, шт.	5
11	Тип соединения суперкондесаторов	Последовательное

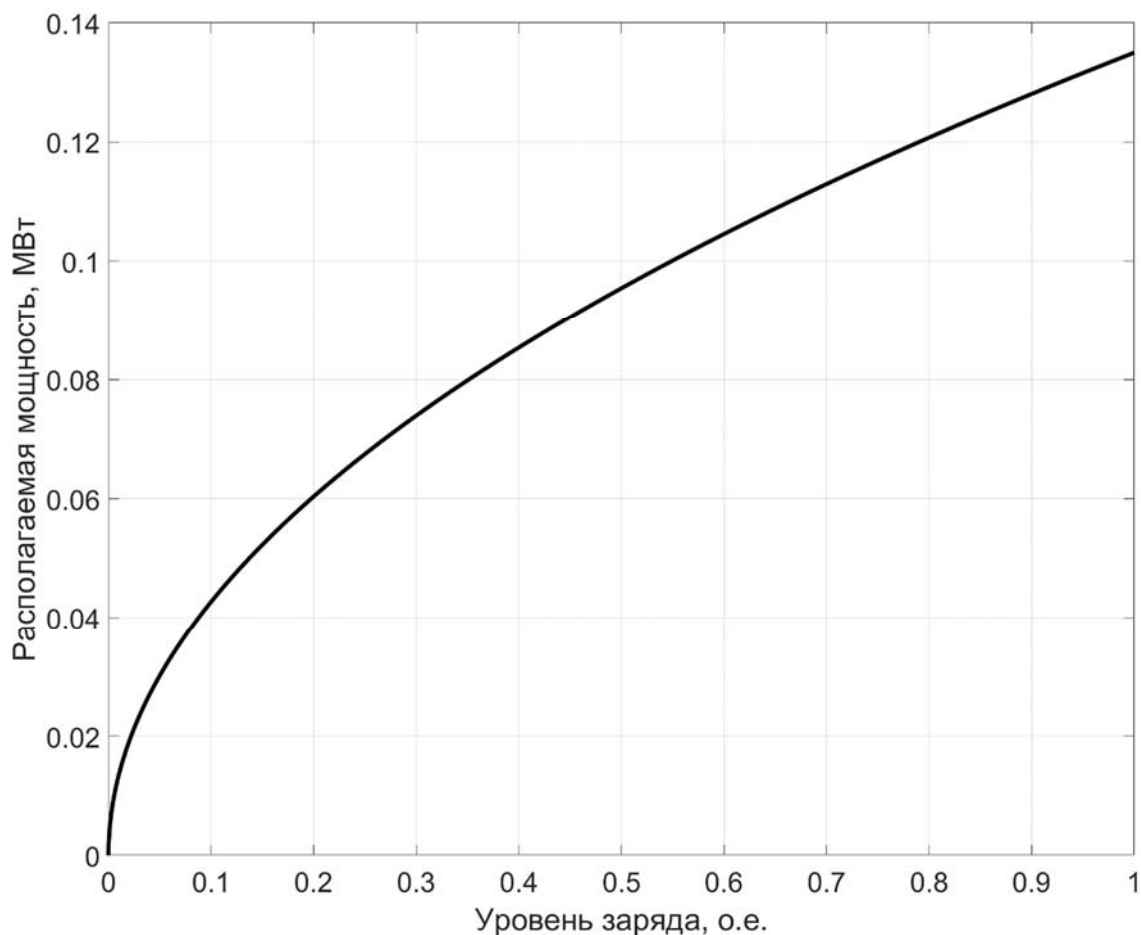
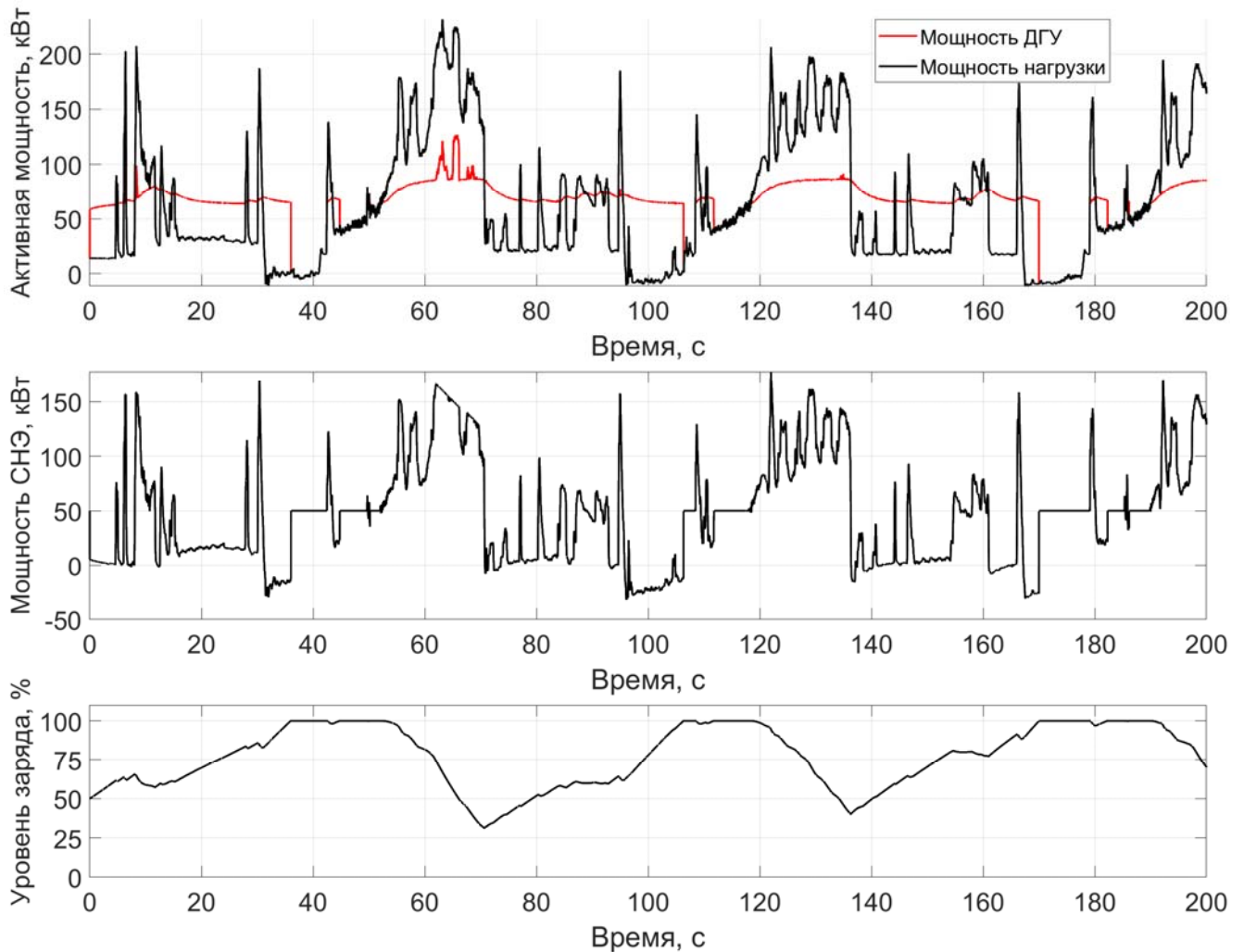


Рисунок 2.16 – Располагаемая мощность СНЭ на базе суперконденсаторов МО-150V53F-0 (см. параметры в таблице 2.5)

Зависимость располагаемой мощности рассчитана для СНЭ, укомплектованной суперконденсаторами с параметрами, приведенными в таблице 2.5. В отличие от СНЭ на базе ЛИА, располагаемая мощность СНЭ с суперконденсаторами не имеет ярко выраженной рабочей зоны. Такой вид характеристики осложняет использование СНЭ на базе суперконденсаторов.

Результаты моделирования показаны на рисунке 2.17.

Результаты расчета показывают, что даже при выходе на граничные условия (при полном заряде или полном разряде) модель адекватно отображает реальные физические процессы в СНЭ. В приведенном примере, выход на граничные условия не позволяет накопителю полностью отработать заложенный алгоритм управления (что может быть использовано для оценки правильности выбора параметров СНЭ).



Верхняя диаграмма – мощность нагрузки и мощность ДГУ, средняя диаграмма – мощность СНЭ, нижняя диаграмма - уровень заряда СНЭ

Рисунок 2.17 – Переходные процессы в автономной энергосистеме подъёмного крана со СНЭ на базе суперконденсаторов

На графике изменения уровня заряда видно, что на интервалах времени 35 – 55 с, 110 – 120 с, 170 – 190 с уровень заряда СНЭ достигает до 100%. СНЭ при этом не способно поглощать энергию (может работать только на выдачу). Этим объясняется то, что на отдельных интервалах времени мощность СНЭ уменьшается до нуля (СНЭ переходит в режим хранения).

2.5.3 СНЭ на базе электромеханического (маховикового) накопителя энергии

В расчетной модели использована СНЭ на базе электромеханического (маховикового) накопителя энергии со следующими параметрами (см. таблицу

2.6). При этом располагаемая мощность СНЭ задается характеристикой, показанной на рисунке 2.18.

Таблица 2.6 – Параметры СНЭ на базе маховикового накопителя энергии мощностью 220 кВт [33]

№ п.п.	Параметр	Значение
1	Максимальная мощность, кВт	220
2	Энергоемкость, МДж (кВт·ч)	12.2 (3.38)
4	Номинальное напряжение СНЭ, кВ	0,4
5	Момент инерции, кг·м ²	248
6	Номинальная скорость вращения, об/мин	3000
7	КПД при заряде, о.е.	0.91
8	КПД при разряде, о.е.	0.8

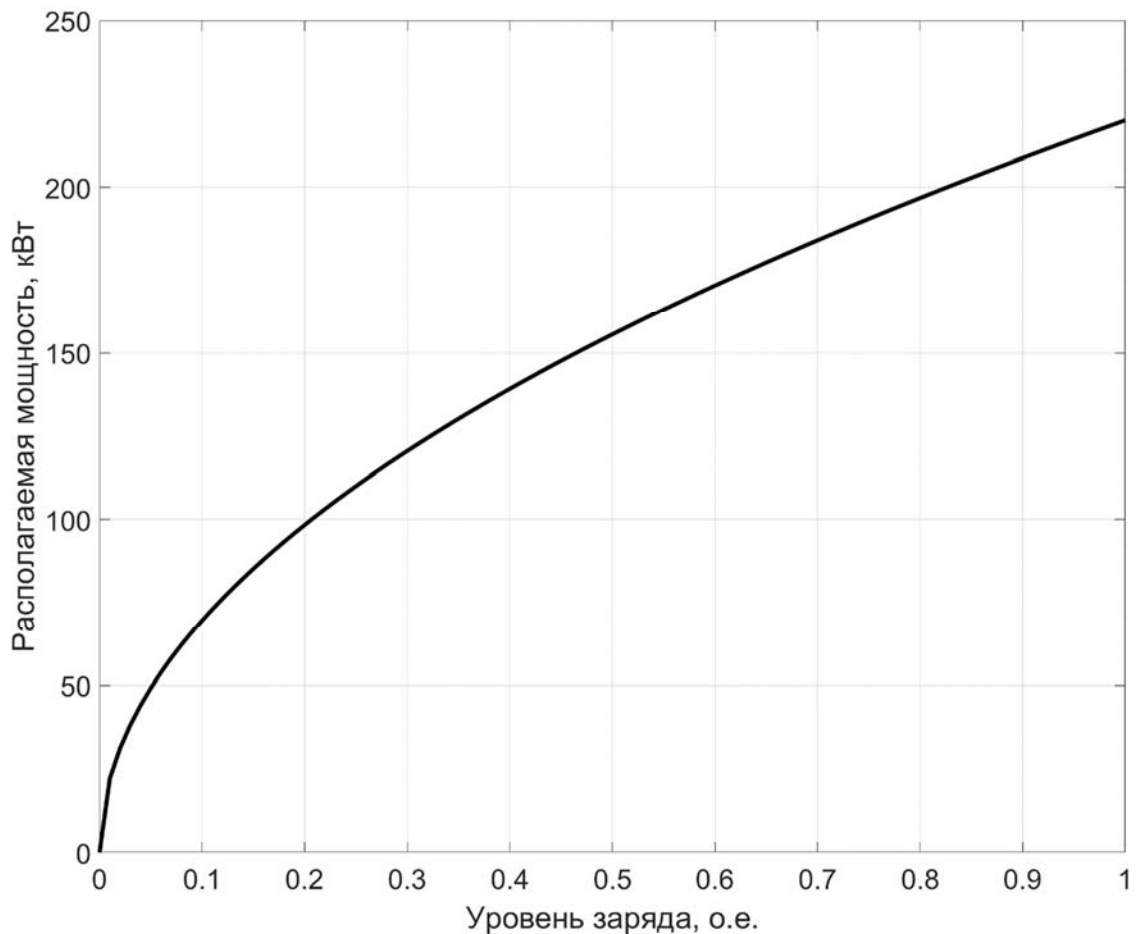


Рисунок 2.18 – Располагаемая мощность СНЭ на базе электромеханического (маховикового) накопителя энергии [34]

Зависимость располагаемой мощности рассчитана для СНЭ с параметрами, приведенными в таблице 2.6. В СНЭ на базе электромеханического (маховикового) накопителя энергии используется асинхронная машина, которая попеременно работает в двигательном и генераторном режимах. Кинетическая энергия запасается во вращающейся массе маховика, который закреплен на одном валу с асинхронной машиной.

Запасенная в маховике кинетическая энергия изменяется по квадратичному закону:

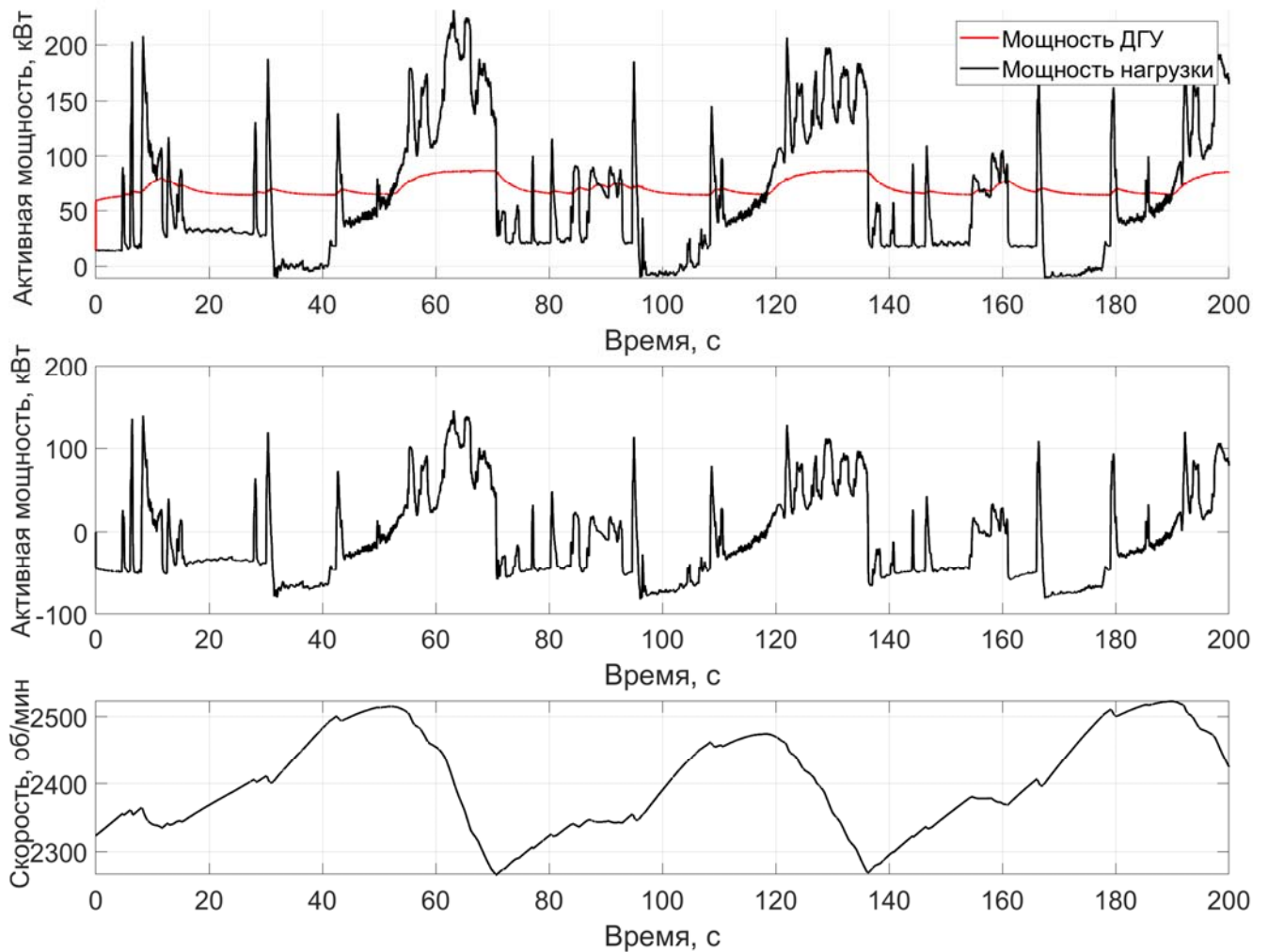
$$W_{\text{Эл.мех.}} = \frac{J \cdot \omega^2}{2} \quad (2.19)$$

где J – момент инерции, (определяются конструкцией, геометрией и физическими параметрами маховика);

ω – угловая скорость вращения маховика.

Скорость вращения маховика в процессе энергообмена определяет запасенную энергию в накопителе. ЭДС асинхронной машины пропорциональна скорости вращения (частоте) вала. Все силовые элементы СНЭ рассчитаны на номинальный ток, который превышать нельзя. Вследствие этого образуется зависимость, при которой при изменении уровня заряда меняется ЭДС накопителя энергии, но при этом номинальный ток не превышает. Как следствие, располагаемая мощность изменяться по квадратичной зависимости от уровня заряда.

В результате моделирования получены осциллограммы, изображенные на рисунке 2.19 (см. параметры в таблице 2.6).



Верхняя диаграмма – мощность нагрузки и мощность ДГУ, средняя диаграмма – мощность СНЭ, нижняя диаграмма – скорость вращения маховика

Рисунок 2.19 – Результаты моделирования СНЭ на базе электромеханического (маховикового) накопителя энергии

Предложенная в диссертации математическая модель позволяет моделировать переходные процессы с применением СНЭ на базе электромеханических накопителей.

Анализ диаграмм переходного процесса показал, что СНЭ на базе электромеханического (маховикового) накопителя энергии (с указанными параметрами) полностью справляется с поставленными задачами. В процессе управления мощностью СНЭ скорость вращения маховика изменяется в диапазоне 2250 – 2550 об./мин. (при номинальной скорости вращения маховика в 3000 об/мин). Это говорит о запасе выбранной СНЭ по энергоемкости, что позволит возложить на нее дополнительные функции.

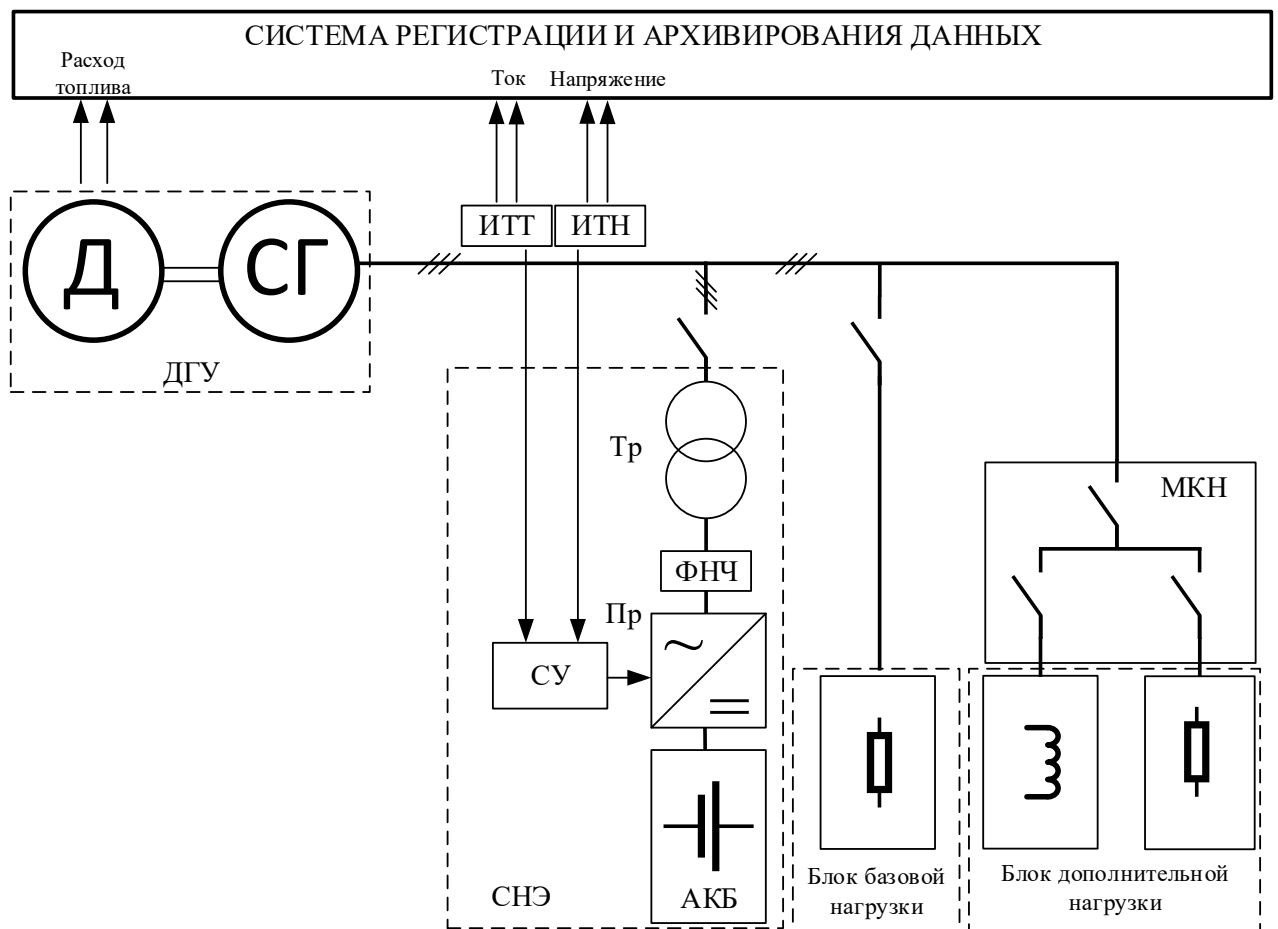
Выводы по главе 2

Выполнен анализ моделей СНЭ в различных ПВК на предмет пригодности для моделирования электромеханических переходных процессов. Недостатки существующих моделей СНЭ можно разделить на две категории: 1). чрезмерная сложность и детализация моделей, что приводит к непригодности таких моделей для расчета электромеханических переходных процессов с использованием СНЭ; 2). чрезмерное упрощение основных подсистем СНЭ, что не позволяет при расчете учитывать основные параметры и характеристики СНЭ. По результатам анализа сформированы требования к математической модели СНЭ. Разработана математическая модель СНЭ для расчета электромеханических переходных процессов.

Работоспособность модели продемонстрирована на трех примерах. Все три примера показывают работоспособность математической модели для рассмотренных типов накопителя. Модель позволяет исследовать любые другие типы накопителей при известной (или рассчитанной) характеристике располагаемой мощности, свойственной рассматриваемому типу СНЭ.

ГЛАВА 3 ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Оценка достоверности разработанной модели СНЭ проводилась путём сравнения результатов расчёта с результатами натурного эксперимента [34]. Эксперименты проводились со СНЭ мощностью 100 кВт и энергоёмкостью 153 кВт·ч с литий-железо-фосфатными аккумуляторами LT-LYP300АН в составе автономной энергосистемы с дизель-генераторной установкой (ДГУ) ЭДД-100 мощностью 100 кВт (125 кВА), работающей на резко переменную нагрузку. Схема экспериментальной автономной энергосистемы представлена на рисунке 3.1.



ДГУ – дизель-генераторная установка ЭДД-100, МКН – модуль коммутирования нагрузки, Тр – согласующий трансформатор, ФНЧ – фильтр нижних частот, Пр – двунаправленный транзисторный преобразователь, АКБ – аккумуляторная батарея, СУ – система управления преобразователя, ИТН – измерительный трансформатор напряжения, ИТТ – измерительный трансформатор тока.

Рисунок 3.1 - Схема экспериментальной автономной энергосистемы

Эксперименты выполнялись на производственной площадке ООО «Системы постоянного тока» в г. Новосибирске специалистами ООО «Системы постоянного тока», ООО «Системы накопления энергии» и Новосибирского государственного технического университета.

Сопоставление расчётных и экспериментальных результатов выполнено на примере двух алгоритмов управления СНЭ: ограничение мощности ДГУ по заданным верхнему и нижнему пределам и ограничение скорости изменения мощности ДГУ при резких и глубоких изменениях мощности нагрузки.

Описание расчетной математической модели

Математическая модель автономной энергосистемы с использованием СНЭ разработана в программном комплексе (ПК) Matlab/Simulink. Модель включает в себя три основных элемента: ДГУ, нагрузку с блоком коммутации и систему накопления энергии (рисунок 3.2).

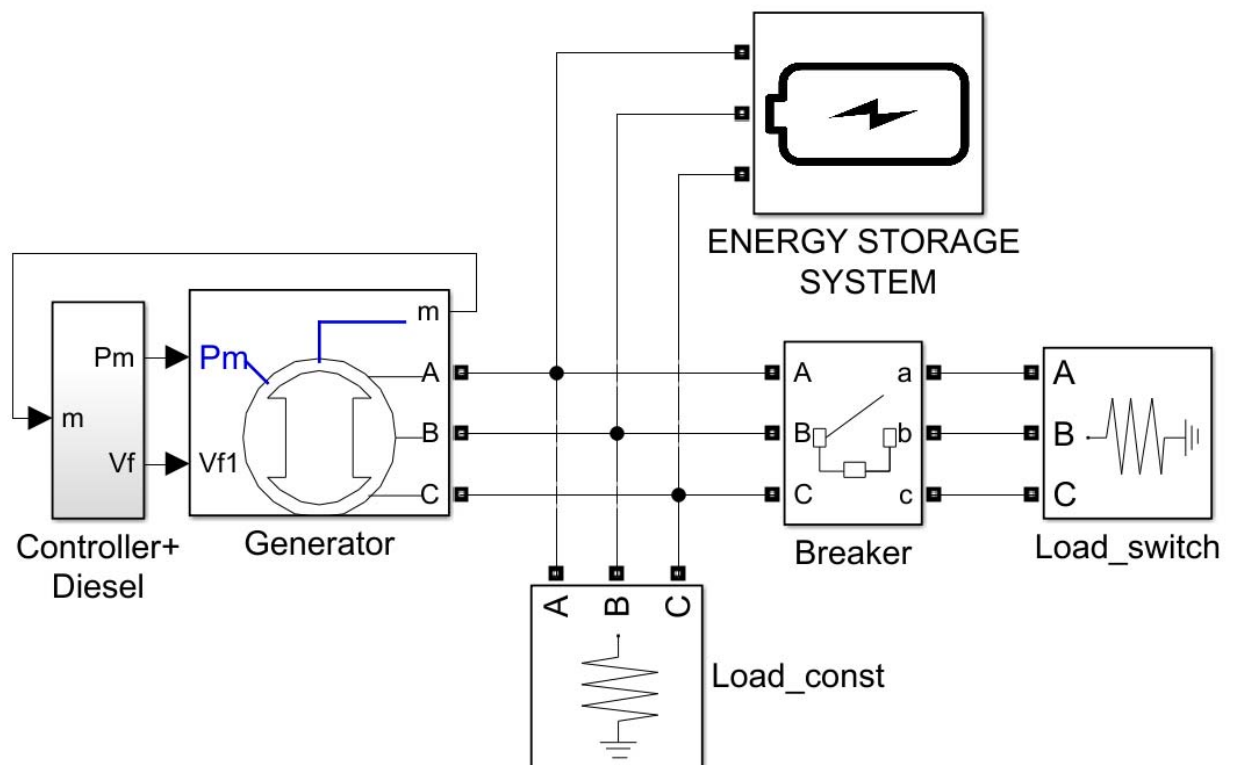


Рисунок 3.2 – Структурная схема исследуемой модели энергосистемы с накопителем энергии в ПК Matlab/Simulink

Модель ДГУ состоит из модели синхронного генератора, оснащенного автоматическим регулятором возбуждения, и модели дизельного двигателя с автоматическим регулятором скорости. Регулятор возбуждения представляет собой типовой АРВ по схеме IEEE 1-го типа [35]. В качестве модели дизельного двигателя с АРС использовалась модель, предложенная в [36]. Структурная схема регуляторов приведена на рисунке 3.3.

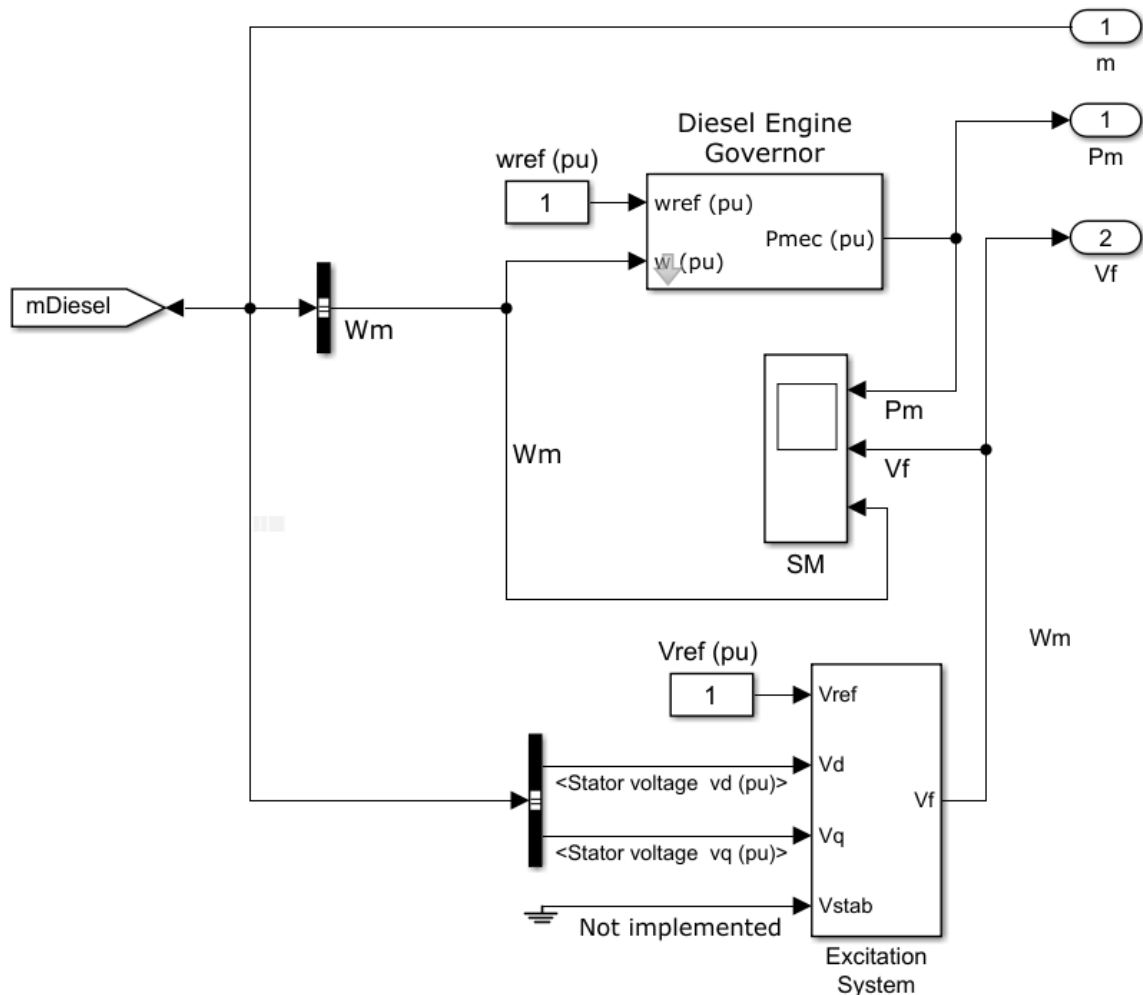


Рисунок 3.3 - Модель АРВ и АРС дизель-генератора в ПК Matlab/Simulink

Модель генератора представлена блоком *Synchronous Generator pu* из стандартной библиотеки Simulink [37]. Электрическая модель генератора представлена синхронной машиной с демпферными обмотками и описывается системой уравнений Парка-Горева [38]:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Psi_d}{dt} + \omega\Psi_q + R_s i_d &= -u_d \\
\omega\Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - R_s i_q &= u_q \\
\frac{d\Psi_f}{dt} + R_{fd} i_{fd} &= u_{fd} \\
\frac{d\Psi_{1d}}{dt} + R_{1d} i_{1d} &= u_{1d} = 0 \\
\frac{d\Psi_{1q}}{dt} + R_{1q} i_{1q} &= u_{1q} = 0
\end{aligned} \tag{3.1}$$

где $\Psi_{d,q}$ – потокосцепление в обмотках статора в соответствующих осях; R_s – активное сопротивление обмотки статора; ω – скорость вращения ротора; $u_{d,q}$ – напряжение обмотки статора в соответствующих осях; Ψ_f – потокосцепление обмотки возбуждения u_{fd} – напряжение обмотки возбуждения; i_{fd} – ток обмотки возбуждения; R_{fd} – активное сопротивление обмотки возбуждения; $i_{d,q}$ – ток обмотки статора в соответствующих осях; u_{1d}, u_{1q} , – напряжение демпферных обмоток в соответствующих осях; R_{1d}, R_{1q} , – активное сопротивление демпферных обмоток; Ψ_{1d}, Ψ_{1q} , – потокосцепление демпферных обмоток; i_{1d}, i_{1q} , – ток демпферных обмоток.

Система дополняется уравнением движения ротора [39]:

$$T_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_T - M_{ЭМ}; \tag{3.2}$$

где δ – угол ротора генератора относительно синхронно вращающейся оси; T_j – механическая инерционная постоянная; M_T – механический момент турбины (разгоняющий момент); $M_{ЭМ}$ – электромагнитный момент генератора (момент сопротивления).

Общая структурная схема СНЭ представлена на рисунке 3.4. В качестве математической модели основного силового элемента СНЭ принимается управляемый источник тока или напряжения. Помимо него, в состав модели СНЭ входит три блока: блок задания основных параметров СНЭ; блок, моделирующий

функционирование подсистем СНЭ во времени; блок системы управления мощностью СНЭ.

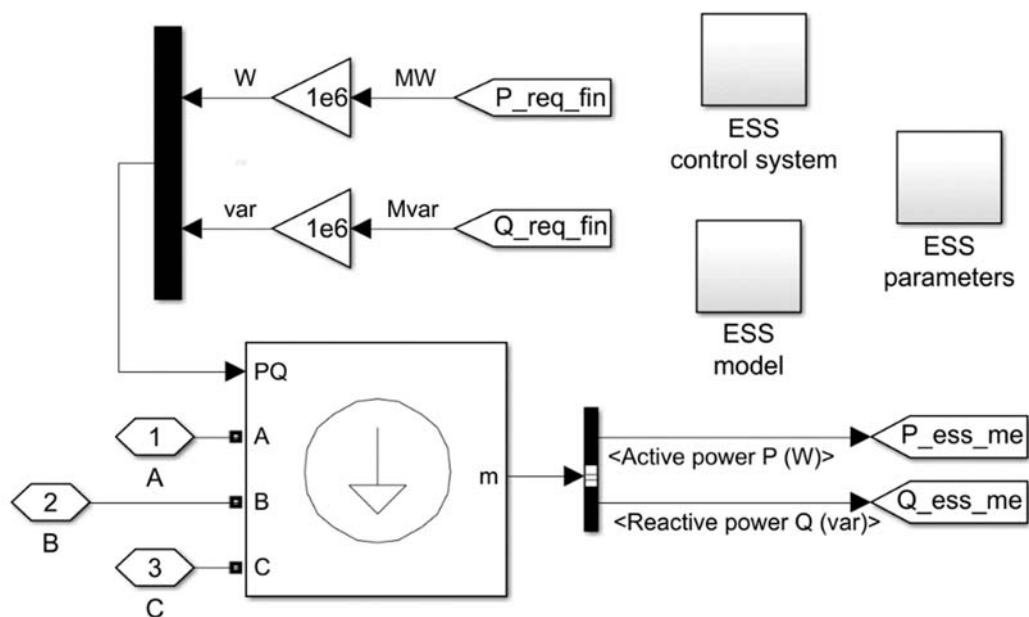


Рисунок 3.4 - Общая структурная схема модели СНЭ

3.1 Сравнение результатов физических экспериментов и расчётов по математической модели

3.1.1 Контрольный опыт (без СНЭ)

Опыт №1 проводился при резкопеременном (повторно-кратковременном) характере активной нагрузки. Длительность цикла изменения нагрузки – 10 с, скважность - 0,5). Базовая нагрузка – 21,6 кВт, дополнительная нагрузка – 67,4 кВт. На рисунках 3.5 и 3.6 представлены экспериментальные осциллограммы переходного процесса в течение двух циклов. Просадка частоты генератора при включении нагрузки составила 3,8 Гц. Через 5с происходит сброс нагрузки, сопровождающийся забросом частоты на 3,1 Гц. Результаты расчёта по математической модели (рисунки 3.7, 3.8) качественно и количественно совпадают с результатами эксперимента.

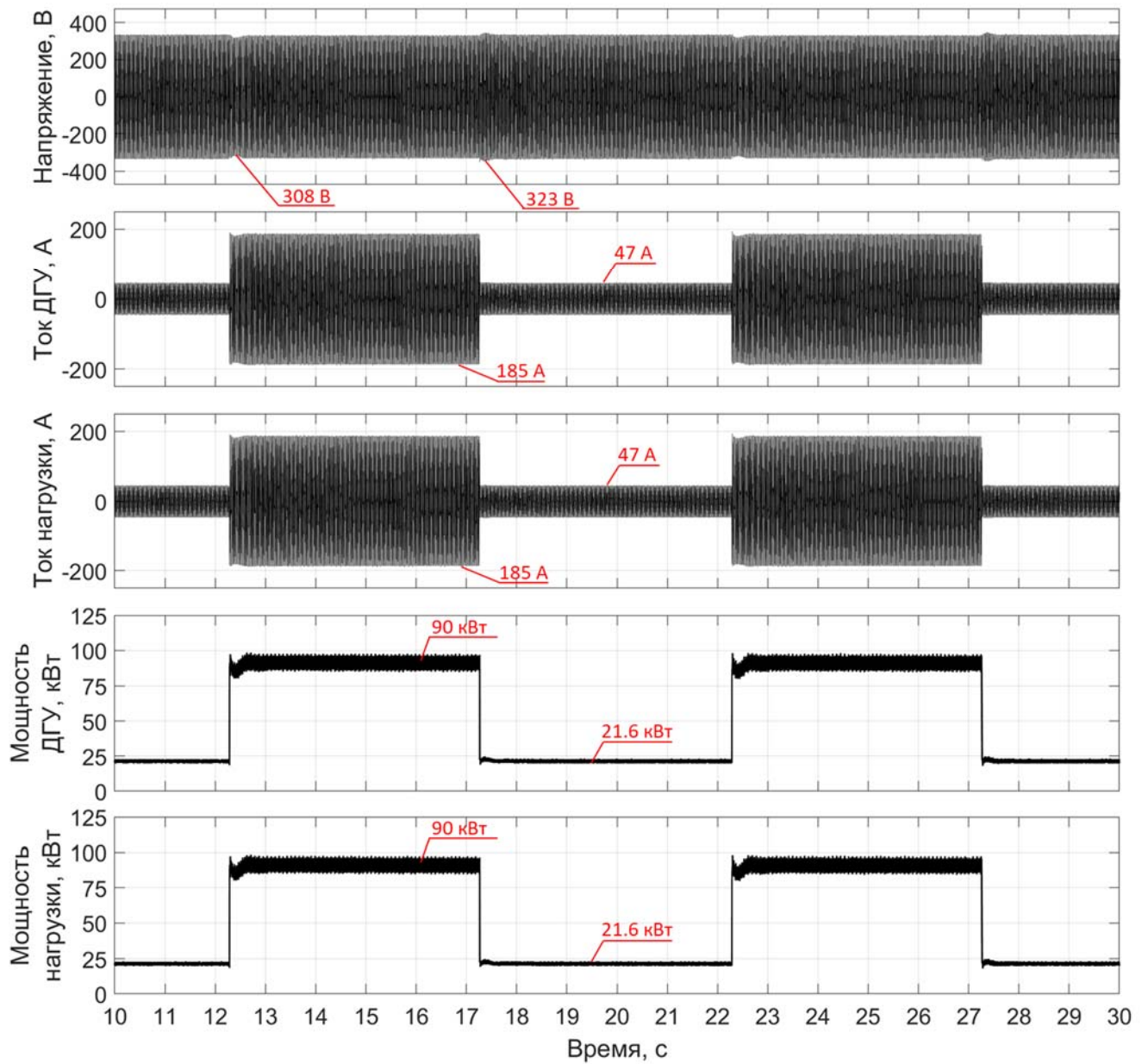


Рисунок 3.5 – Эксперимент: переходный процесс при опыте №1

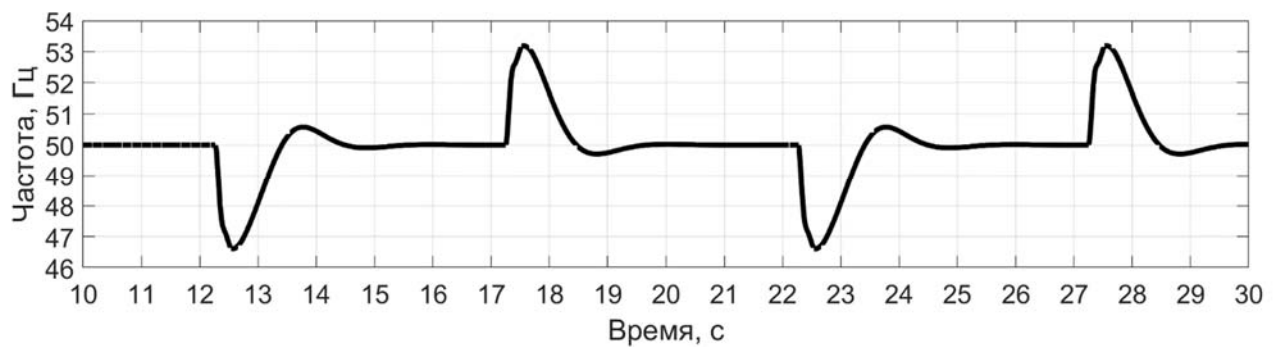


Рисунок 3.6 – Эксперимент: отклонение частоты при опыте №1

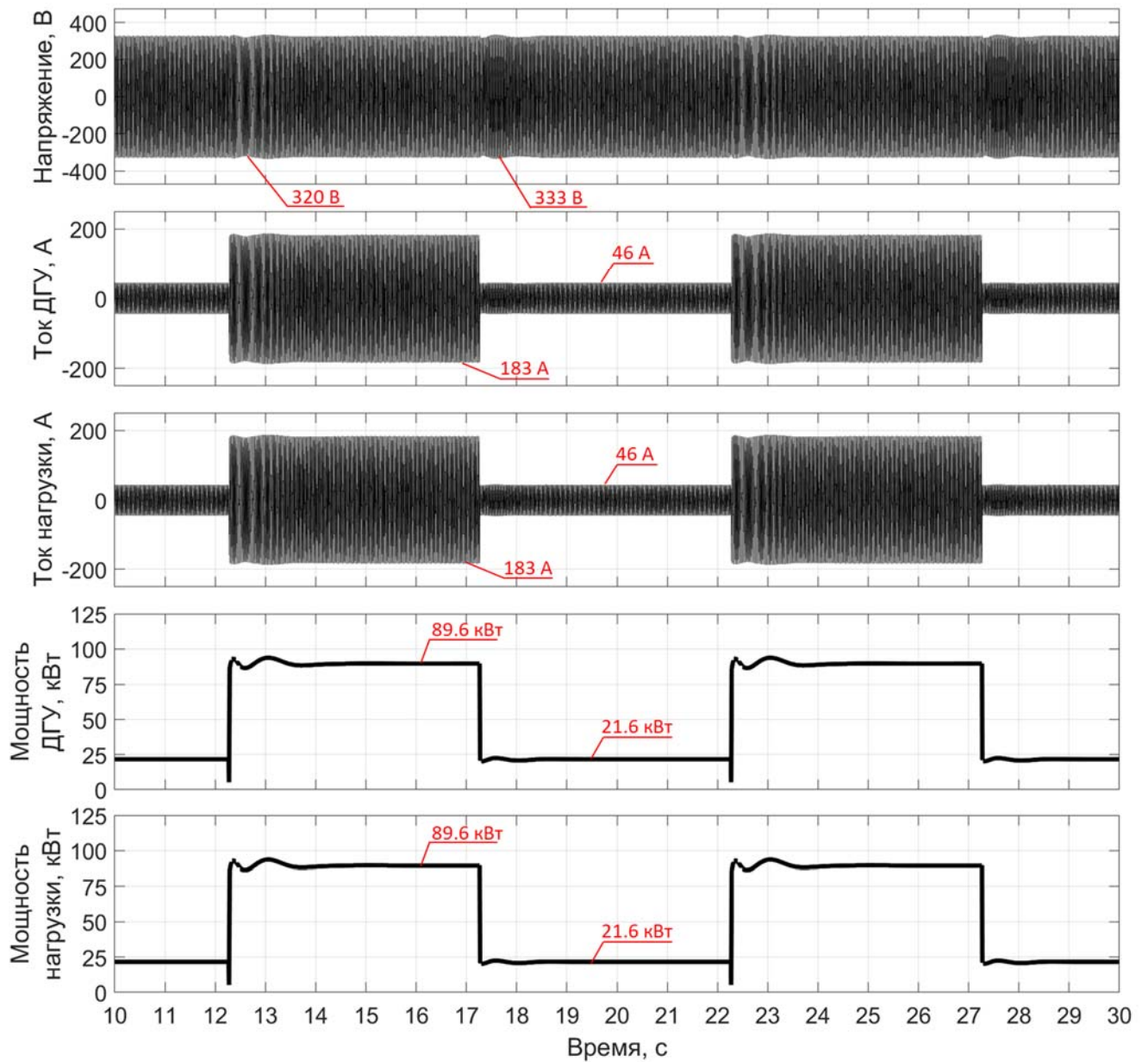


Рисунок 3.7– Расчёт: переходный процесс при опыте №1

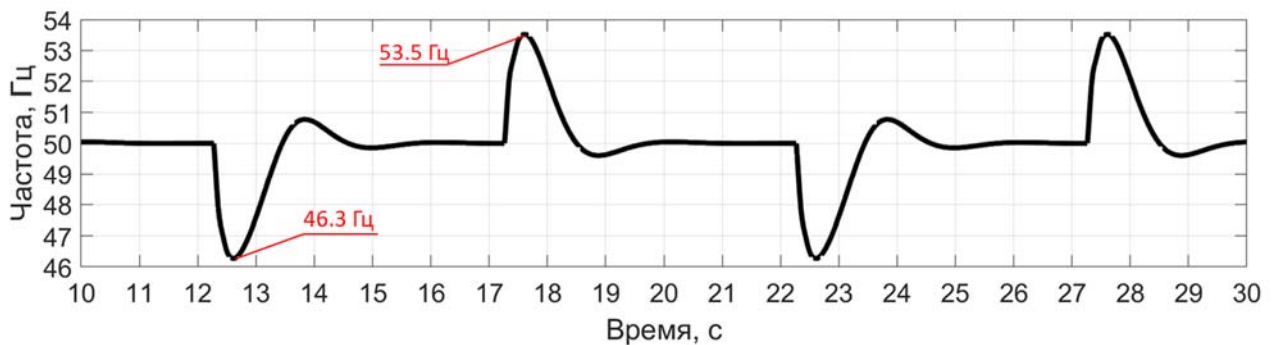


Рисунок 3.8 – Расчёт: отклонение частоты при опыте №1

Основное отличие натуральных осциллограмм от расчётных – «зашумленность» их сигналов мощности и частоты. Для мощности это объясняется незначительной

несимметрией трехфазной нагрузки, а также погрешностью измерительной аппаратуры. При расчете по математической модели этот недостаток отсутствует.

Частота при обработке результатов натурального эксперимента рассчитывалась из синусоиды напряжения, что при любой коммутации в силовых цепях приводит к резкому увеличению погрешности её определения. При расчёте по математической модели частота рассчитывалась из скорости вращения ротора генератора, поэтому является гладкой функцией времени, в отличие от частоты, полученной в результате эксперимента.

3.1.2 Опыт ограничения минимальной и максимальной мощности дизель-генераторной установки с помощью СНЭ

Опыт №2 выполнялся в той же последовательности, что и контрольный. В отличие от контрольного опыта в состав энергосистемы включена СНЭ с предварительно заряженной АКБ и настроенной на ограничение максимальной и минимальной мощности ДГУ (уставки СНЭ: минимальная мощность генератора 45кВА, максимальная – 65кВА). При превышении мощностью нагрузки значения максимальной уставки разницу между фактической мощностью нагрузки и уставкой (мощностью 65 кВт) выдает СНЭ за счёт накопленной в АКБ энергии. При снижении мощности нагрузки ниже нижней уставки (45 кВА) разницу потребляет СНЭ, запасая энергию в АКБ. На рисунках 3.9, 3.10 представлены экспериментальные осциллограммы переходного процесса в течение двух циклов. Просадка частоты (рисунок 3.10) после наброса мощности составила 1,53 Гц (на 60% меньше, чем в опыте без СНЭ). Заброс частоты после сброса мощности – также составил 1,53 Гц. На рисунках 3.11, 3.12 показаны осциллограммы, полученные расчётным путём по предлагаемой математической модели.

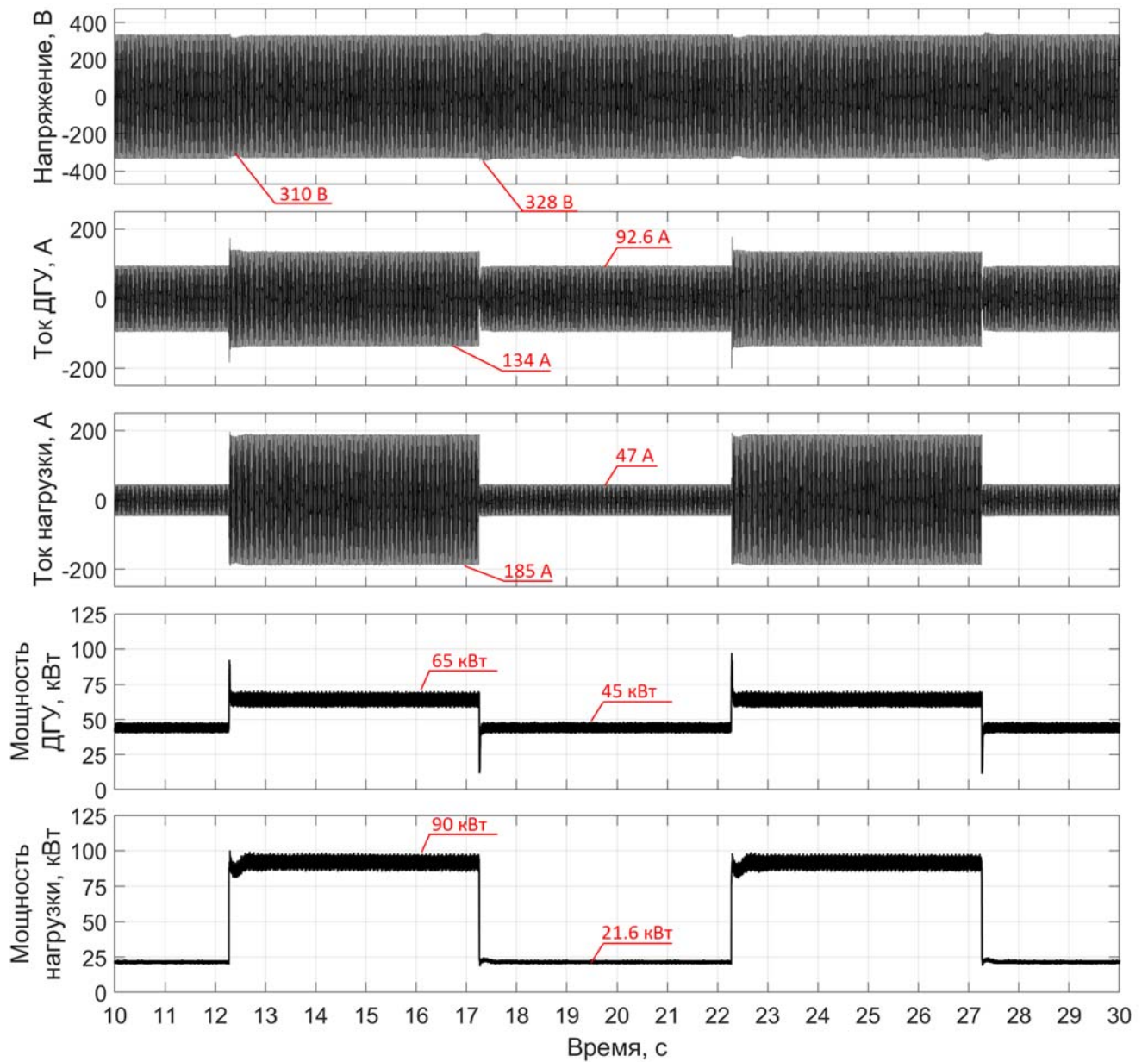


Рисунок 3.9 – Эксперимент: переходный процесс при опыте №2

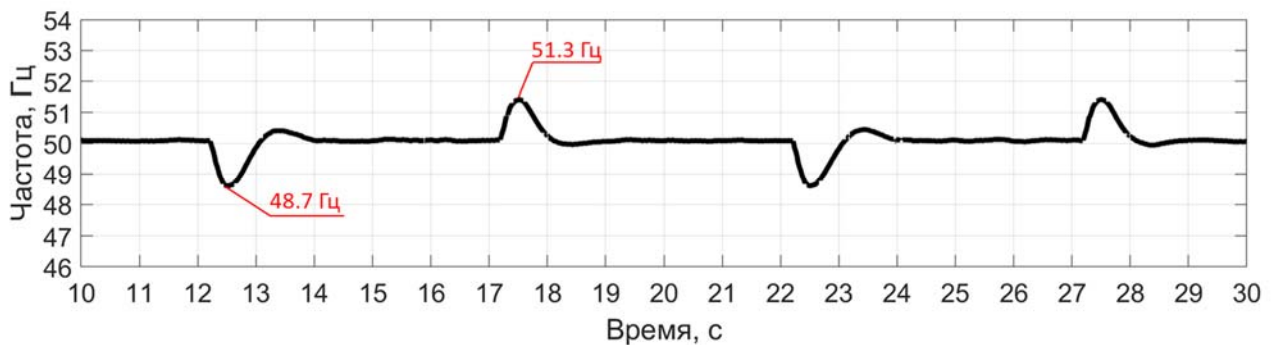


Рисунок 3.10 – Эксперимент: отклонение частоты при опыте №2

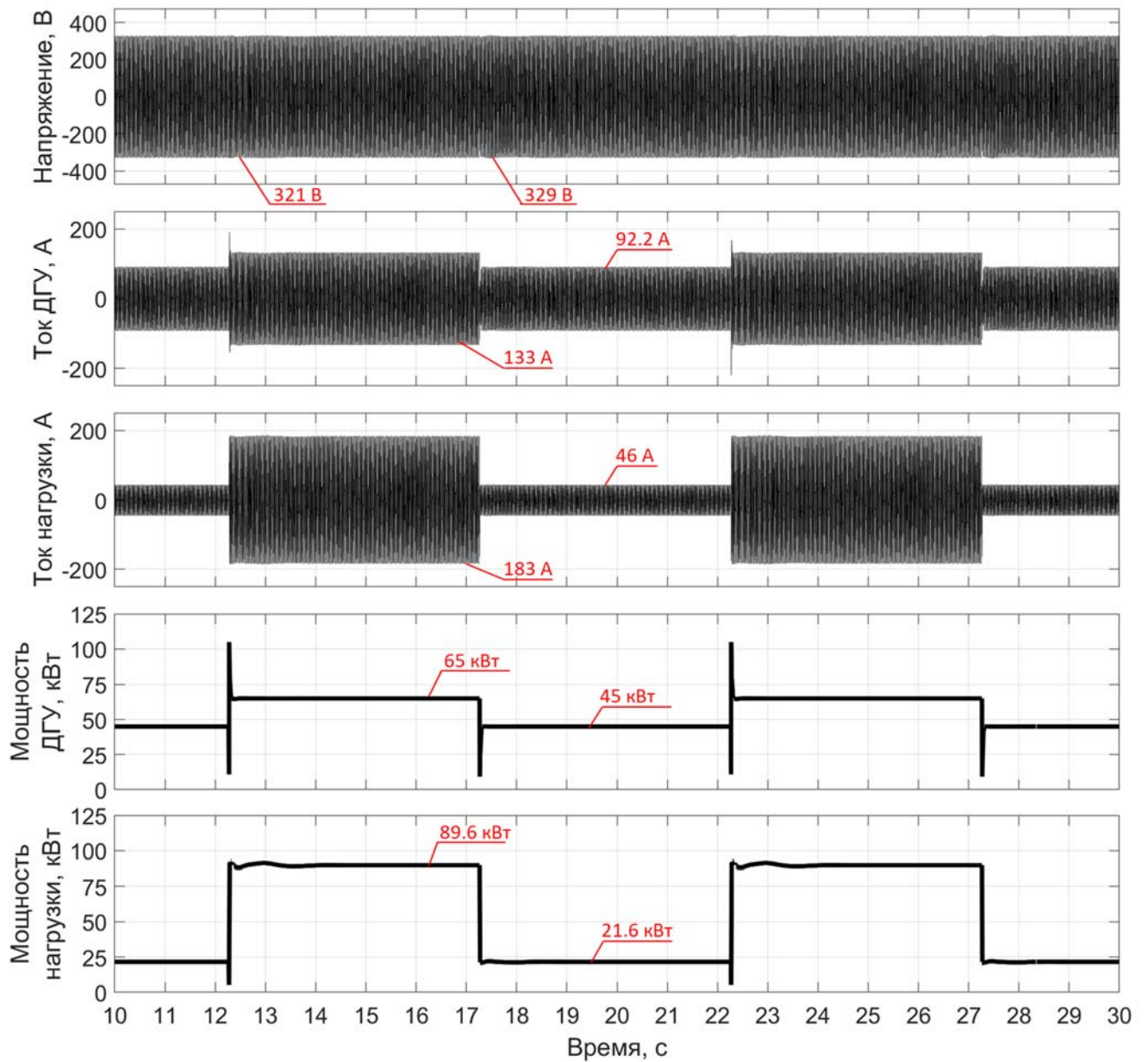


Рисунок 3.11 – Расчёт: переходный процесс при опыте №2

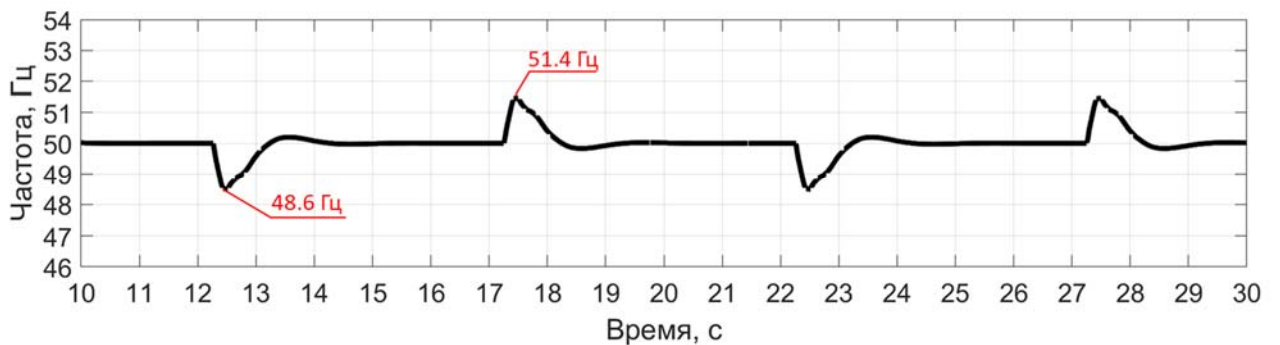


Рисунок 3.12 – Расчёт: отклонение частоты при опыте №2

В рассматриваемом опыте мощность генератора кратковременно выходит за указанные в алгоритме границы мощности (это видно на расчетных и

экспериментальных осциллограммах). Такое кратковременное отклонение от уставок объясняется временем реакции СНЭ. Но следует отметить, что подобные кратковременные превышения не оказывают влияния на работу ДГУ (видно из графиков частоты), так как энергия этого воздействия пренебрежительно мала.

3.1.3 Опыт ограничения скорости изменения мощности дизель-генераторной установки с помощью СНЭ

Опыт №3 проводился по той же схеме, что и предыдущий. Но в отличие от него алгоритм управления СНЭ ограничивал скорость изменения мощности ДГУ значением 100 кВт/с. При превышении заданной уставки СНЭ обеспечивала плавное изменение мощности ДГУ при резких изменениях мощности нагрузки.

На рисунках 3.13, 3.14 представлены экспериментальные осциллограммы переходного процесса переходного процесса в течение двух циклов. Просадка частоты генератора при включении нагрузки составила 1,4 Гц. Через 5с происходит сброс нагрузки, сопровождающийся забросом частоты на 1,7 Гц. Из графика изменения мощности ДГУ видно, что мощность генератора изменяется плавно. При этом нагрузка изменяется ступенчато. Разность мощности между генерацией и потреблением берет на себя СНЭ.

На рисунках 3.15, 3.16 приведены расчётные переходного процесса в течение двух циклов для опыта ограничения скорости изменения мощности ДГУ. В рассматриваемом опыте получено качественное и количественное совпадение с результатов расчета с натурным экспериментом.

Следует отметить, что при ограничении скорости изменения мощности ДГУ отклонения частоты меньше, чем без использования СНЭ. При использовании различных алгоритмов управления СНЭ и их комбинаций возможно эффективное использование СНЭ для задач регулирования частоты.

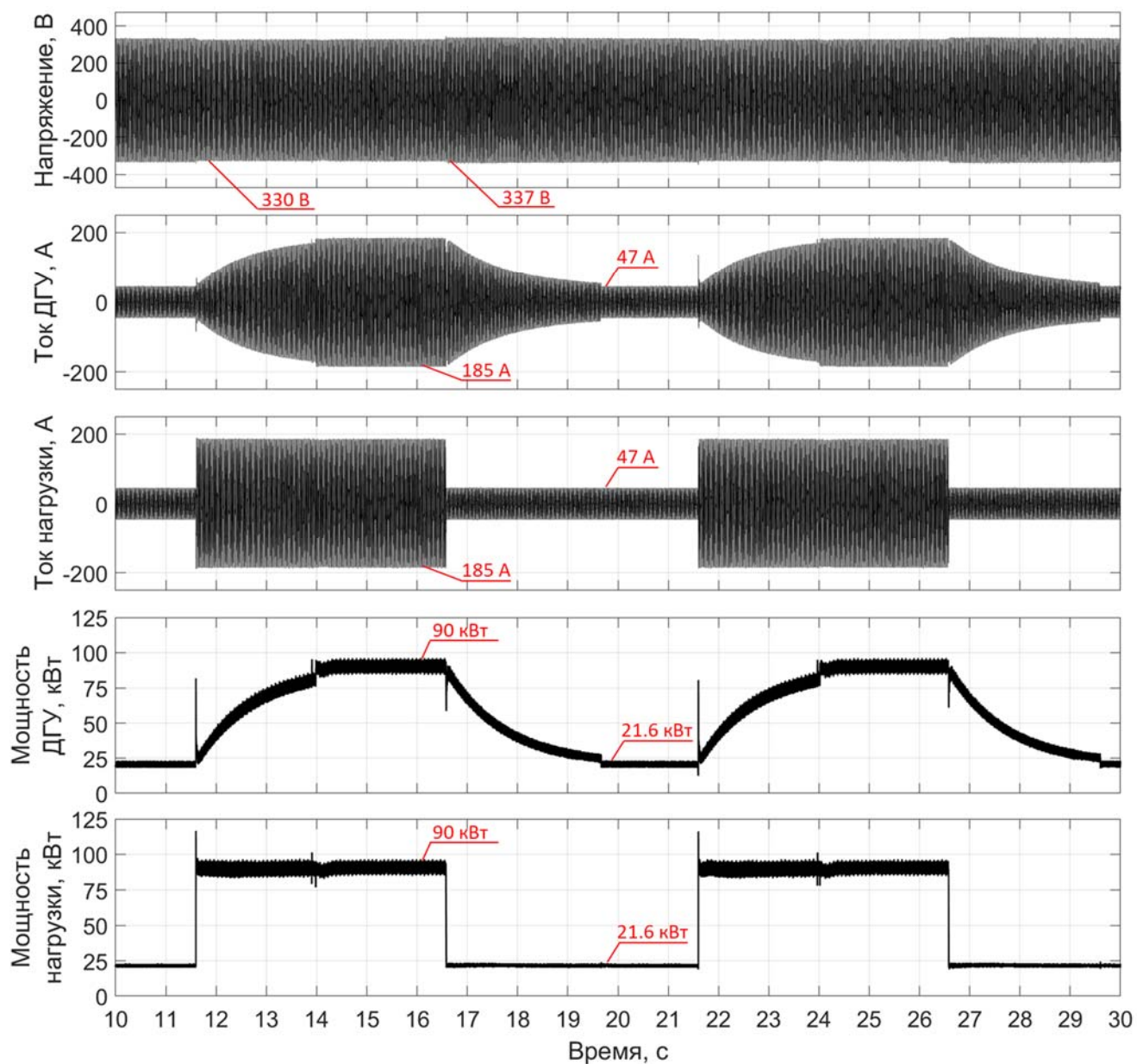


Рисунок 3.13 – Эксперимент: переходный процесс при опыте №3

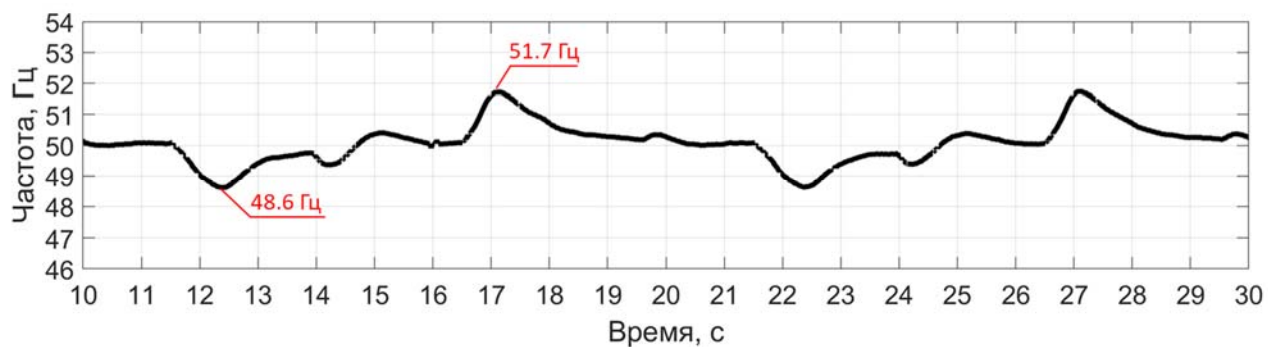


Рисунок 3.14 – Эксперимент: отклонение частоты при опыте №3

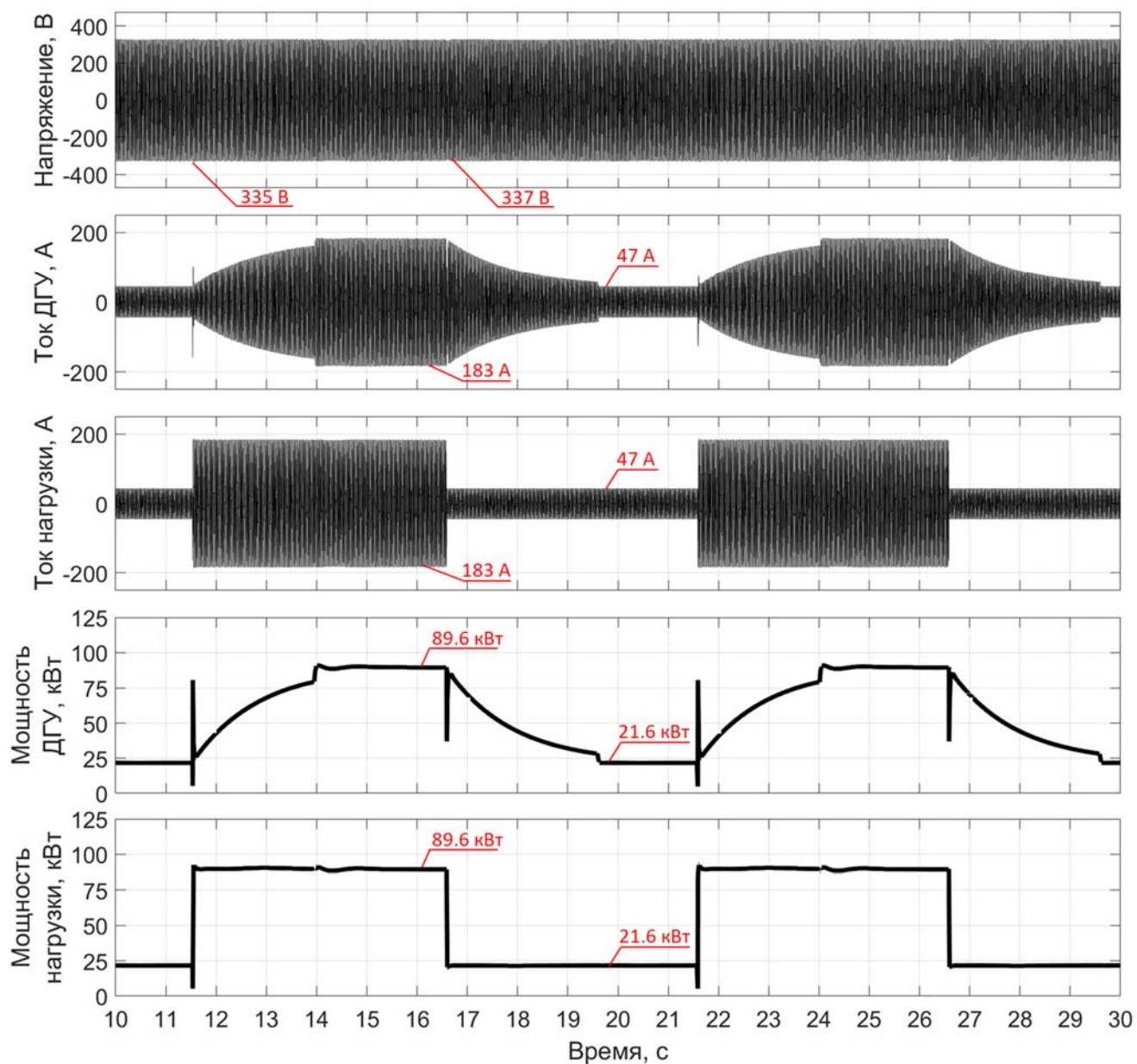


Рисунок 3.15 – Расчёт: переходный процесс при опыте №3

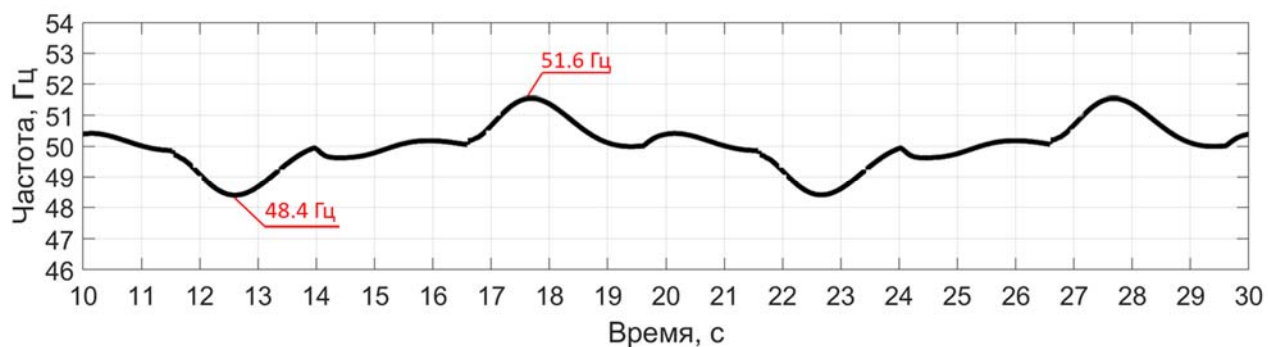


Рисунок 3.16 – Расчёт: отклонение частоты при опыте №3

Точность разработанной математической модели подтверждается количественным сравнением результатов эксперимента и расчёта по ряду характерных режимных параметров, представленных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Количественное сравнение показателей расчетного эксперимента с натурным

<i>Опыт</i>	<i>Параметр</i>	<i>Натурный эксперимент</i>	<i>Расчетная модель</i>	<i>Отклонение, %</i>
Без СНЭ	Максимальная мощность ДГУ, кВт	90	89.6	0.44
	Минимальная мощность ДГУ, кВт	21.6	21.6	0.00
	Максимальная частота, Гц	53.3	53.5	0.38
	Минимальная частота, Гц	46.5	46.3	0.43
СНЭ Опыт №1	Максимальная мощность ДГУ, кВт	45	45	0.00
	Минимальная мощность ДГУ, кВт	65	65	0.00
	Максимальная частота, Гц	51.3	51.4	0.19
	Минимальная частота, Гц	48.7	48.6	0.20
СНЭ Опыт №2	Максимальная мощность ДГУ, кВт	90	89.6	0.44
	Минимальная мощность ДГУ, кВт	21.6	21.6	0.00
	Максимальная частота, Гц	51.7	51.6	0.19
	Минимальная частота, Гц	48.6	48.4	0.38

Для сравнения использованы точки локальных экстремумов мгновенной мощности и мгновенной частоты ДГУ. Разница между экспериментальными и расчётными значениями во всех контрольных точках не превышает 0,5%, что указывает на вполне приемлемую точность математической модели для расчётов электромеханических переходных процессов в энергосистемах.

Выводы по главе 3

Для верификации математической модели использованы результаты натуральных и расчетных экспериментов. Эксперименты проводились со СНЭ мощностью 100 кВА и энергоёмкостью 153 кВт·ч с литий-железо-фосфатными аккумуляторами LT-LYP300АН в составе автономной энергосистемы с ДГУ мощностью 100 кВт (125 кВА). В ходе экспериментов СНЭ испытывалась в двух режимах: режим ограничения максимальной и минимальной мощности ДГУ, режим ограничения скорости изменения мощности ДГУ.

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов показывает не только их качественное, но и вполне удовлетворительное количественное совпадение. Причём, необходимо подчеркнуть, что совпадение результатов, показанное в таблице 3.1, получено, несмотря на то, что в расчётах использованы типовые, а не индивидуальные параметров ДГУ, регуляторов частоты и напряжения (ввиду их недоступности). Это подтверждает достоверность предложенной модели СНЭ и возможность её использования в современных программных комплексах для расчётов переходных электромеханических процессов в энергосистемах, в составе которых эксплуатируются системы накопления энергии.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ЭНЕРГООБЪЕКТА ДЛЯ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ СНЭ

4.1 Применение теории мгновенной мощности для обработки результатов мониторинга режимных параметров

Большая часть расчётов режимов электроэнергетических систем производится по действующим значениям переменных при условии линейности характеристик всех силовых элементов и симметрии их фазных параметров. Как правило, рассчитываются действующие значения токов, напряжений, средние значения активной, реактивной и полной мощности.

Применение СНЭ для управления активной и реактивной мощности в энергосистеме требует сопоставимой по скорости реакции потенциальным возможностям СНЭ быстродействующей системы управления. СНЭ является многофункциональным устройством, способным управлять активной и реактивной мощностью. Входными сигналами для системы управления СНЭ могут являться любые режимные параметры энергосистемы или их сочетания. С другой стороны, расчёт и выбор параметров СНЭ должен основываться на анализе графиков нагрузки энергетического объекта по активной и реактивной мощности, которые могут быть получены только по результатам мониторинга.

Современные цифровые технические средства позволяют регистрировать режимные параметры энергосистемы с высокой точностью и высокой частотой дискретизации (опроса). Для корректного отображения основных электромагнитных параметров режима в основном достаточно регистрировать их с частотой дискретизации не менее 2 кГц [40]. Вся информация о режимных параметрах содержится в мгновенных значениях токов и напряжений. Из них могут быть получены (вычислены) все необходимые для управления и анализа параметры режима энергосистемы в точке подключения регистрирующего устройства.

Полная мгновенная мощность, рассчитываемая по выражению

$$p = u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c \quad (4.1)$$

где u_a, u_b, u_c – мгновенные значения напряжений;

i_a, i_b, i_c – мгновенные фазные значения токов;

не даёт полной информации, необходимой для выработки сигналов управления или для построения графиков активной и реактивной мощности. При учёте нелинейности и несимметрии элементов энергосистемы **полная** мощность включает в себя **активную** и **неактивную** мощности. Неактивная мощность в свою очередь состоит из **реактивной** мощности, мощности **искажения** и мощности **несимметрии**.

Разработанная в последние десятилетия XX века Теория Мгновенной Мощности (ТММ) [41], даёт удобный математический аппарат для расчёта всех составляющих полной мощности и других параметров режима, на основе которых формируются сигналы управления СНЭ и могут быть построены графики нагрузки.

4.1.1 Расчет частоты

Частота – один из необходимых параметров для применения ТММ. Частота рассчитывается по синусоиде напряжения: фиксируются времена перехода синусоиды напряжения через ноль, далее, рассчитывается период (или полупериод) синусоиды, а из него – частота. При резко переменном стохастическом характере нагрузки скачкообразно изменяется фазовый угол напряжения и, соответственно, момент смены знака мгновенного значения напряжения, что приводит к увеличению погрешности при определении действительного значения частоты. Влияет на точность определения частоты и наличие кривой напряжения высших гармоник. Фильтрация и обработка входного сигнала (мгновенного значения фазного напряжения) позволяет получать достаточно точные значения частоты, необходимые для последующих преобразований режимных параметров.

4.1.2 Расчет мощности

Согласно теории мгновенной мощности, мгновенная активная мощность характеризует полный поток энергии (в симметричных системах) в единицу времени между двумя связанными системами. Мгновенная реактивная мощность –

это мощность, пропорциональная количеству энергии, которой обмениваются фазы нагрузки, она не участвует в совершении полезной работы и по сути не вносит вклад в передачу энергии от источника к нагрузке. В симметричных системах мгновенная мощность нулевой последовательности не оказывает влияние на величину мгновенной активной и реактивной мощностей. В несимметричных системах мгновенная мощность нулевой последовательности, суммируясь с мгновенной активной мощностью, характеризует полный поток энергии в единицу времени между двумя связанными системами, то есть участвует в передаче энергии нагрузке (рисунок 4.1) [41].

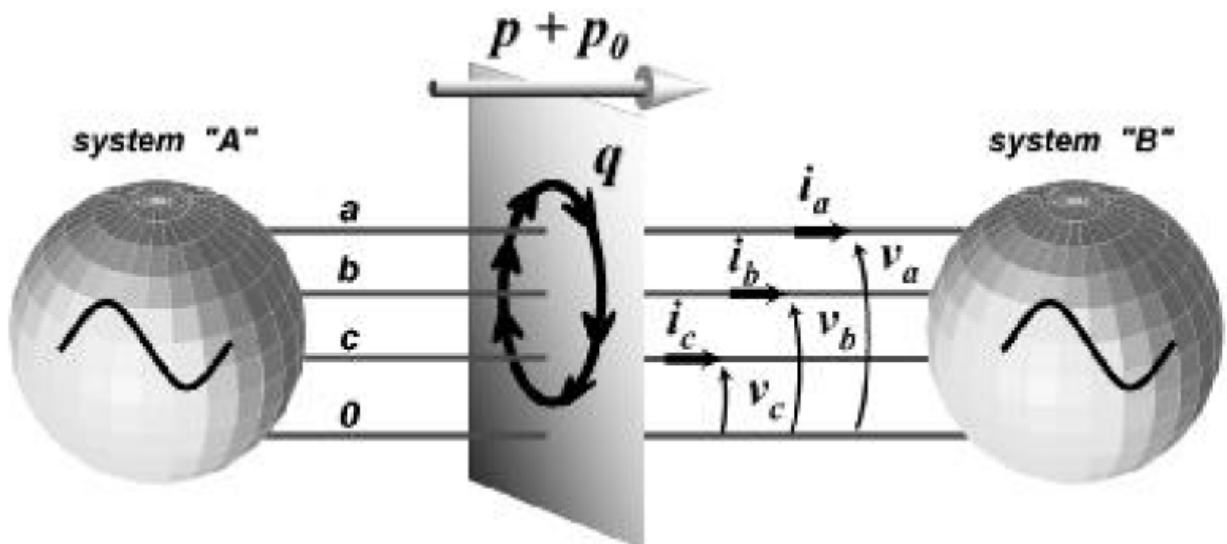


Рисунок 4.1 – Распределение мощностей согласно теории мгновенной мощности

В основе теории мгновенной мощности лежит матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_d & v_q \\ 0 & v_q & -v_d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

С помощью этого уравнения можно вычислить значения мгновенной активной (в том числе активной для нулевой последовательности) и реактивной мощностей. При традиционном способе вычисления мгновенной мощности можно рассчитать только мгновенную активную мощность. Использование теории мгновенной мощности позволяет выделить отдельно реактивную, нулевую и активную составляющие мощности.

В уравнении (4.2) токи и напряжения берутся в координатах $dq\theta$, перевод в которые из координат abc производится с помощью преобразования Парка. Преимущество этого преобразования заключается в том, что происходит переход от неподвижных координат abc в координаты $dq\theta$, вращающиеся с угловой скоростью ω , в которых в установившемся режиме переменные не меняют свои значения во времени. Для токов:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Для напряжений:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

В сетях среднего напряжения (6–35 кВ) возможен переход от системы координат abc в систему координат dq , путём исключения из уравнений нулевой координаты, которая определяет нулевую составляющую переменных величин (рисунок 4.2). Это справедливо для сетей среднего напряжения на территории РФ и стран бывшего СССР, там, где применяется изолированная нейтраль (трехпроводная сеть).

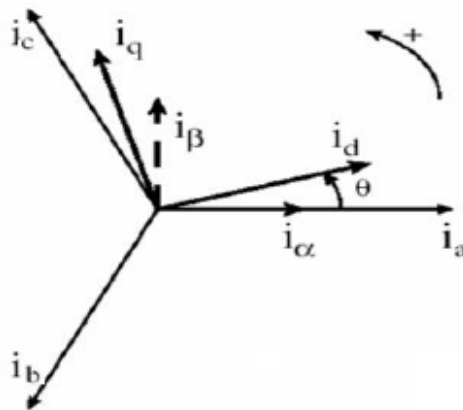


Рисунок 4.2 – Переход от координат abc к координатам dq и $\alpha\beta$

При переходе от системы координат abc в систему координат dq уравнения 4.3 и 4.4 после исключения нулевой составляющей примут вид для токов:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Для напряжений:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Используя основные положения p - q теории вычисляются мгновенные значения мощности:

$$\begin{cases} p = v_d i_d + v_q i_q \\ q = v_q i_d - v_d i_q' \end{cases} \quad (4.7)$$

где v_d и v_q – соответственно мгновенные значения напряжения сети в координатах dq ; i_d и i_q – мгновенные значения токов; p и q – активная и реактивная мгновенные мощности, которые являются суммой мощности основной гармоники и мощности искажения:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} - \tilde{q}' \end{cases} \quad (4.8)$$

где \bar{p} – полезная активная мощность нагрузки; \bar{q} – реактивная синусоидальная составляющая; переменные составляющие \tilde{p} и \tilde{q} представляют собой компоненты искажений, вносимые нелинейной нагрузкой.

С помощью уравнения (4.1) можно вычислить значения мгновенной активной мощности, активной мощности нулевой последовательности и реактивной мощности. В этом уравнении токи и напряжения берутся в координатах $dq0$, перевод в которые из координат abc производится с помощью преобразования Парка.

Приведя уравнения 4.7 в матричный вид, получим:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d & v_q \\ v_q & -v_d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Результатом будут матрицы, содержащие значения мгновенных активных и реактивных мощностей для каждого момента времени.

Полученные мгновенные значения мощности (p , q) следует преобразовать в традиционный для решения электроэнергетических задач вид – усредненные за период промышленной частоты значения активной и реактивной мощности (P , Q). Расчёт производится по выражениям:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt, \text{ где } T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.10)$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt, \text{ где } T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.11)$$

4.1.3 Пример обработки осциллограмм токов и напряжений

В качестве примера применения ТММ ниже приводятся результаты обработки режимных параметров в системе электроснабжения буровых установок БУ 5000/320 ЭКБМ в нормальных технологических режимах. Режимные параметры получены при проведении в период с 26.11.2017 г. по 02.12.2017 г. мониторинга системы электроснабжения на одном из нефтедобывающих предприятий Красноярского края. Приведены примеры графиков нагрузки.

Результаты измерений хранятся в массивах, содержащих информацию, записанную в 7-канальном формате (время, i_a , i_b , i_c , u_a , u_b , u_c). Пример представления результатов измерений представлен на рисунке 4.3. Необходимо преобразовать эти массивы (токов, напряжений) в мощности P , Q .

Используя алгоритмы и уравнения ТММ, рассчитываются режимные параметры системы электроснабжения предприятия в традиционном виде, удобном для использования в системе управления СНЭ. По результатам расчётов строятся временные зависимости следующих переменных: мгновенная активная (p) и реактивная (q) мощность, усреднённые за период значения активной (P) и реактивной (Q) мощности, частота сети (f) (рисунок 4.4).

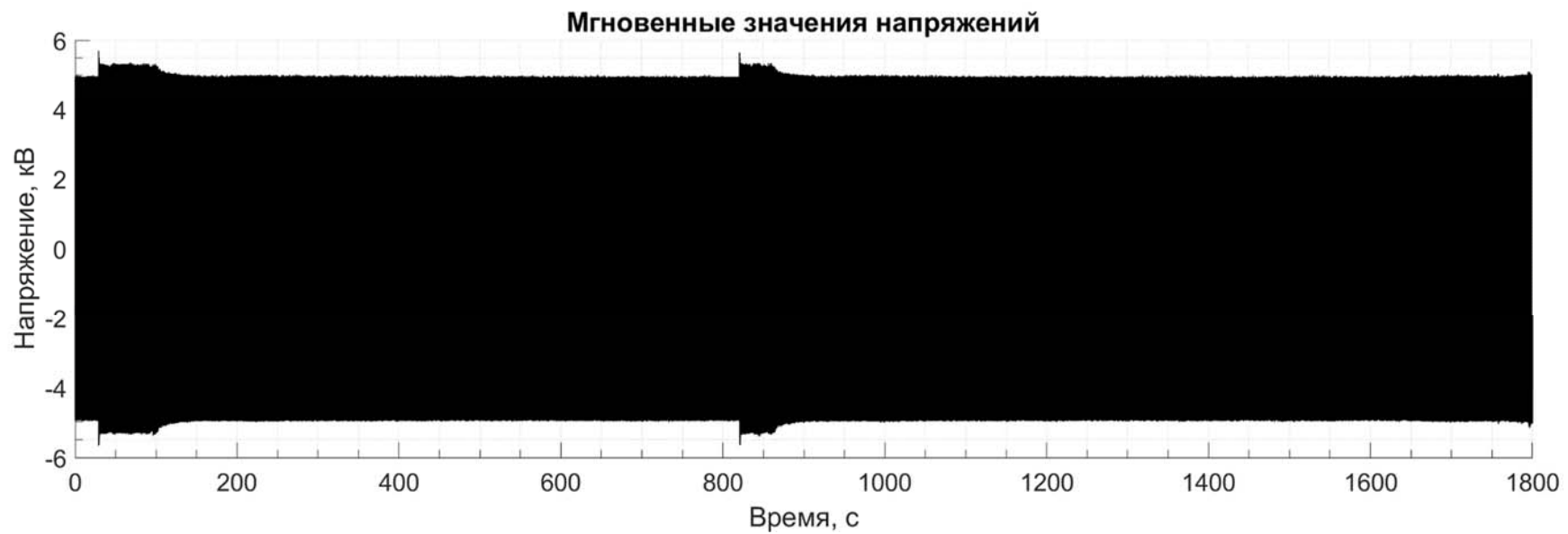
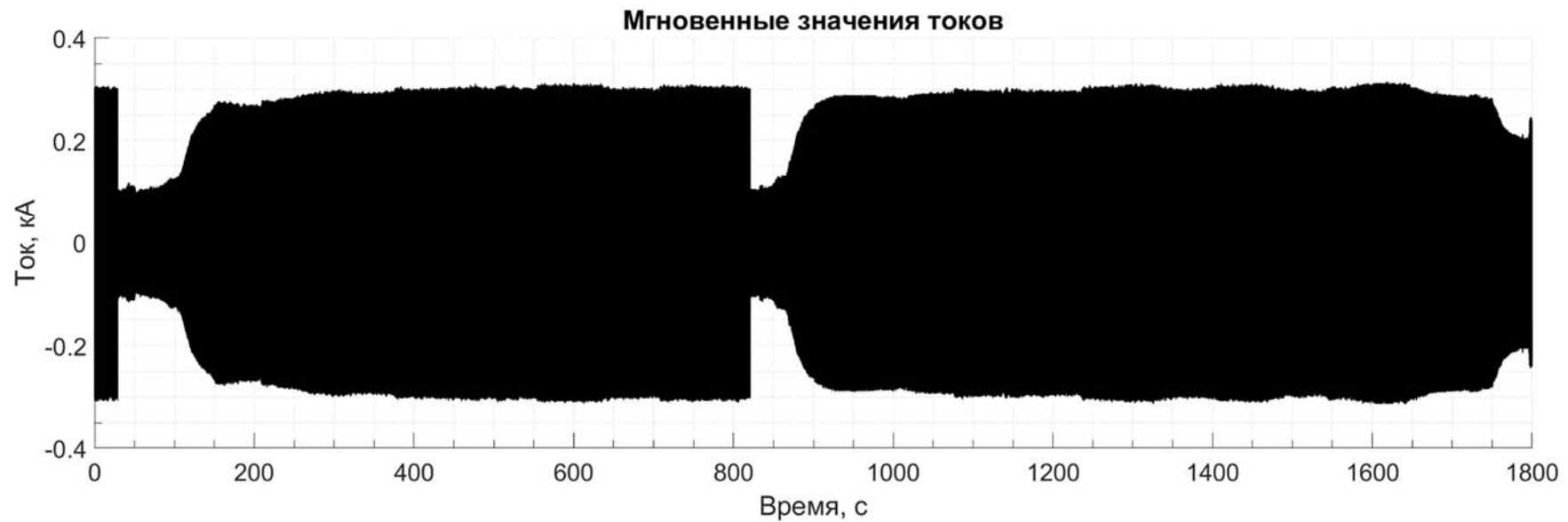


Рисунок 4.3 – Пример представления результатов обработки данных мониторинга (I_A , U_a , p , f)

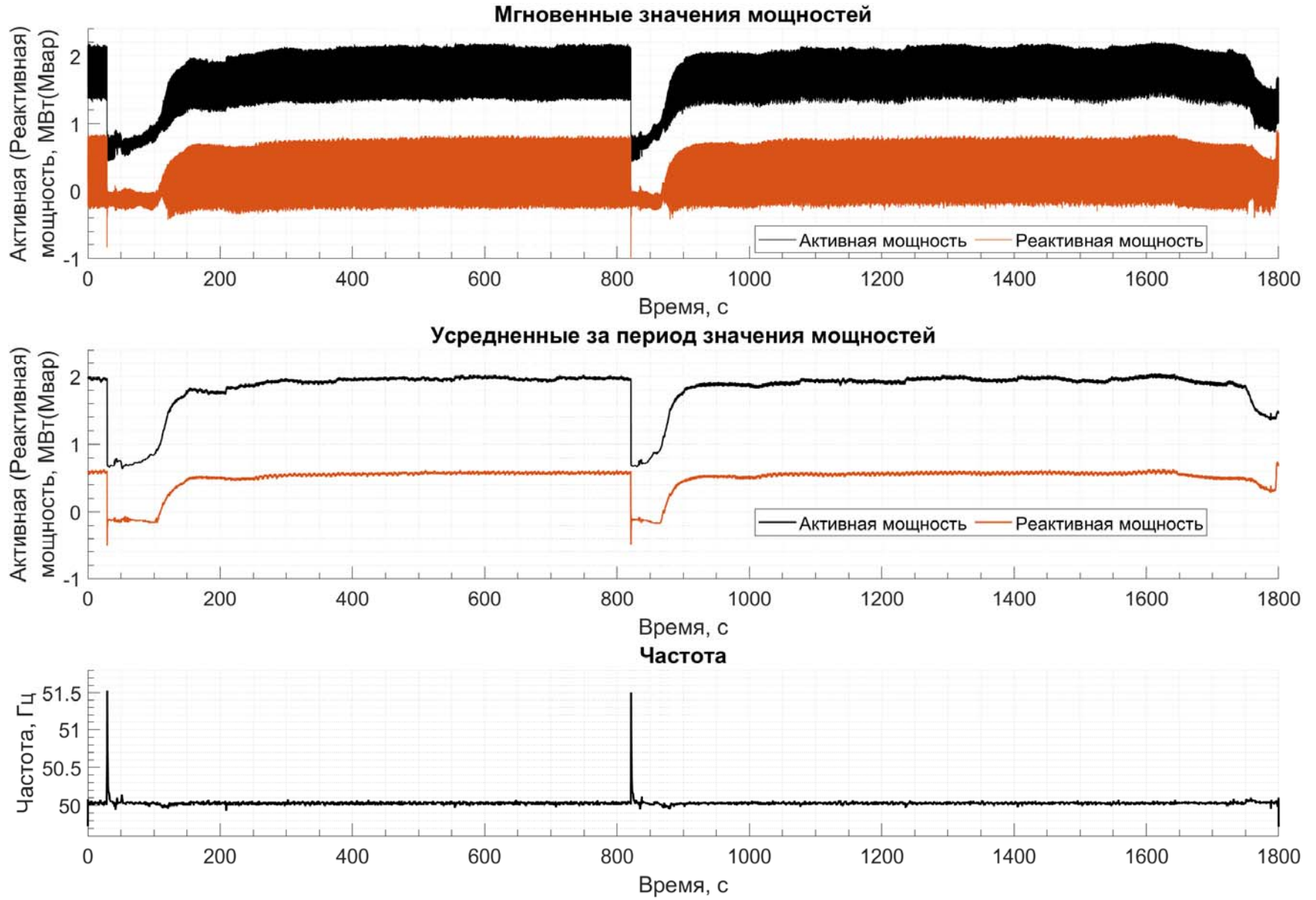


Рисунок 4.4 – Пример представления результатов обработки данных мониторинга ($p-q$, $P-Q$, $\cos\varphi$)

На основании анализа полученной информации формулируется функциональное назначение СНЭ и производится выбор его основных параметров.

4.2 Применение преобразования Фурье для анализа нагрузочных диаграмм

В диссертационной работе предложена методика расчета параметров СНЭ (см. главу 5). Методика базируется на анализе нагрузочных диаграмм, полученных по результатам мониторинга режимных параметров исследуемого объекта.

Один из этапов реализации методики предполагает расчет и построение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ, Фурье-образ функции) нагрузочной диаграммы объекта. Для нагрузочной диаграммы можно выделить следующие особенности:

1. Нагрузочная диаграмма – непериодическая функция;
2. Нагрузочная диаграмма представлена набором дискретных значений, записанных с частой дискретизации регистратора (осциллографа).

В качестве инструмента для реализации возможности расчета и построения АЧХ нагрузочной диаграммы в диссертационной работе использовалось преобразование Фурье.

Преобразованием Фурье называют совокупность математических методов, которые основаны на разложении исходной непрерывной функции времени, заданной аналитически или в табличном виде, на систему гармонических (синусоидальных) функций, каждая из которых характеризуется частотой, амплитудой и фазой.

На рисунке 4.5 представлена функция, которая определена на временном интервале, а также ее отображение на частотном интервале, которое получено с помощью преобразования Фурье [42].

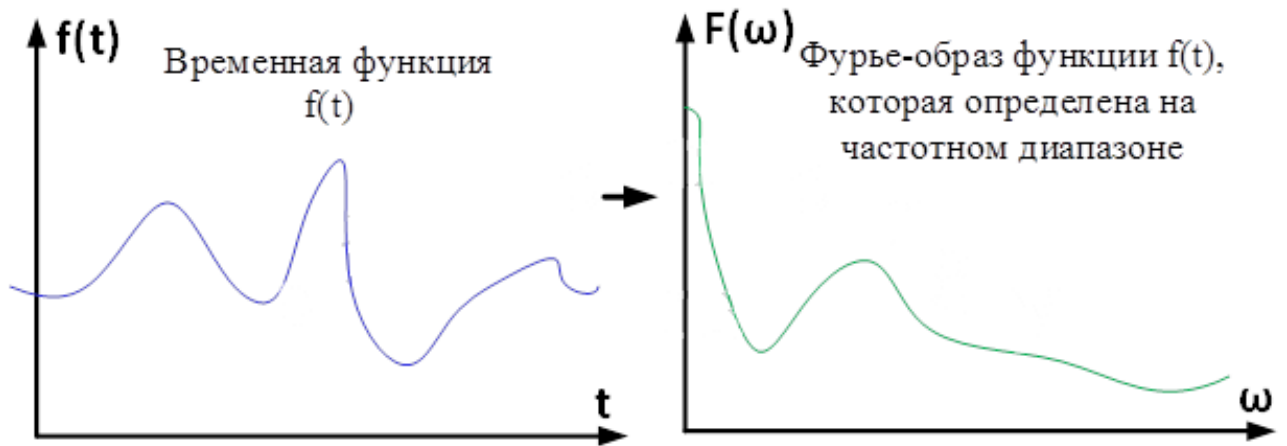


Рисунок 4.5 – Временная функция и ее Фурье-образ

Преобразование Фурье является основополагающим для спектрального анализа.

Спектральный анализ – это способ обработки сигналов, позволяющий охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала.

Различают несколько видов преобразования Фурье в зависимости от вида представления исходного сигнала [43]:

- непрерывное преобразование Фурье (НПФ) - (в англоязычной литературе Continue Time Fourier Transform – CTFT или, сокращенно, FT);

- дискретное преобразование Фурье (ДПФ) – (в англоязычной литературе Discrete Fourier Transform – DFT);

- быстрое преобразование Фурье (БПФ) – (в англоязычной литературе Fast Fourier transform – FFT).

Непрерывное преобразование фактически представляет собой обобщение рядов Фурье при условии, что период функции, подлежащей разложению, устремляется к бесконечности. Другими словами, классическое преобразование Фурье имеет дело со спектром сигнала, взятом во всем диапазоне существования переменной.

Дискретное преобразование Фурье — это одно из преобразований Фурье, которое широко применяется в алгоритмах цифровой обработки сигналов.

Непрерывное преобразование Фурье используют при анализе сигналов, изменяющихся в соответствии с заданными аналитическими функциями. На

практике, чаще всего, приходится иметь дело с результатами измерений, которые представляют собой дискретные данные: результаты измерений фиксируются через равные промежутки времени с определённой частотой дискретизации.

Согласно теореме Котельникова (в иностранной литературе встречаются названия «теорема Найквиста-Шеннона», «теорема отсчетов»), аналоговый периодический сигнал, имеющий конечный (ограниченный по ширине) спектр ($0 \dots f_{max}$), может быть однозначно восстановлен без искажений и потерь по своим дискретным отсчётам, взятым с частотой, большей или равной удвоенной верхней частоте спектра - частоте дискретизации ($f_{дискр} \geq 2 * f_{max}$). Например, при частоте дискретизации 1 000 Гц из аналогового периодического сигнала можно восстановить сигнал с частотой до 500 Гц.

Быстрое преобразование Фурье представляет собой определенный алгоритм вычисления, позволяющий уменьшить количество производимых действий относительно прямого вычисления ДПФ. В основе алгоритма лежит разбиение заданной последовательности отсчетов дискретного сигнала на несколько промежуточных последовательностей. Следует отметить, что алгоритм БПФ точнее стандартного ДПФ, поскольку при сокращении операций снижаются суммарные ошибки округления.

В настоящее время известны несколько алгоритмов быстрого преобразования Фурье, которые являются частными случаями единого алгоритма, базирующегося на разбиении одного массива чисел на два, с последующим рекурсивным вычислением каждого массива чисел по дискретному преобразованию Фурье и объединением результатов расчетов [44].

Для гармонического анализа графиков нагрузки, полученных в результате мониторинга электроэнергетических объектов, учитывая дискретный характер информации, наиболее целесообразно использовать быстрое преобразование Фурье (БПФ).

В главе 5 приведены примеры применения быстрого преобразования Фурье для анализа нагрузочных диаграмм объектов, с целью расчета параметров СНЭ, по предложенной автором методике.

Выводы по главе 4

Для обработки результатов мониторинга энергообъектов с целью расчета основных параметров СНЭ предложено использовать ТММ и БПФ.

ТММ позволяет на основе результатов регистрации режимных параметров (токи, напряжения) рассчитывать режимные параметры системы электроснабжения предприятия в традиционном виде, удобном для использования в системе управления СНЭ (частота сети, мгновенная активная (p) и реактивная (q) мощность, усреднённые за период значения активной (P) и реактивной (Q) мощности).

БПФ позволяет выполнять расчет и построение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ, Фурье-образ функции) нагрузочной диаграммы объекта, представленной непериодической функцией, записанной с частотой дискретизации регистратора (осциллографа).

ГЛАВА 5 МЕТОДИКА ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

5.1 Основные параметры системы накопления энергии как элемента энергосистемы и обзор методик их расчета

СНЭ, как и любой другой элемент энергосистемы характеризуется рядом физических параметров. В их перечень входят: номинальная энергоёмкость, номинальная мощность, предельное количество полных циклов заряд/разряд, характеристика зависимости предельного числа циклов заряд/разряд от их глубины, КПД, постоянная саморазряда, удельная энергоёмкость (кВт·ч/кг или /м³) и ряд других параметров.

Рассматривая СНЭ с позиции управления режимами и электромеханическими переходными процессами в энергосистемах (в т.ч. в противоаварийном управлении), прежде всего выделяют три основных параметра: номинальная мощность, номинальная энергоёмкость и время отклика.

Время отклика у современных быстродействующих СНЭ - электрохимических, сверхпроводниковых индуктивных, ёмкостных, электромеханических – не превышает 5 – 10 мс. Поэтому с достаточной для расчёта электромеханических процессов точностью это время можно принимать как расчётное время отклика.

Под номинальной мощностью понимается то значение мощности, на которое рассчитаны все силовые элементы СНЭ. С этой мощностью СНЭ может работать неограниченно длительное время.

При определении термина «энергоёмкость СНЭ» часто возникают разногласия в интерпретации его значения. Это обусловлено различными физическими и химическими процессами, протекающими в разных типах накопителей энергии (электромеханических, литий-ионных аккумуляторов, суперконденсаторах, СПИНах и др.). Чаще всего разногласия возникают при определении номинальной энергоёмкости с учетом допустимых циклов заряд-разряд; допустимой глубиной разряда; рабочим диапазоном степени заряда, при

котором накопитель работает в нормальных для него условиях, не снижая ресурс до истечения срока службы.

Ряд исследователей [45-47] использует термин «обменная энергоёмкость»: понимая под ним то количество энергии, которым СНЭ должна обмениваться с энергосистемой в процессе управления мощностью при решении поставленной перед СНЭ задачей. При одинаковой обменной энергоёмкости (для решения одной и той же задачи), номинальная энергоёмкость СНЭ может значительно отличаться для разных типов накопителей. Номинальная энергоёмкость определяется с учетом расчётной обменной энергоёмкости, а также при выбранном типе накопителя энергии и заданном ресурсе по количеству циклов. Обменная энергоёмкость не отражает конечные параметры СНЭ, такие как: предельное количество полных циклов заряд/разряд, характеристику зависимости предельного числа циклов заряд/разряд от их глубины, КПД, постоянную саморазряда, удельную энергоёмкость (кВт·ч/кг или /м³). Этот параметр является исходным для определения номинальной энергоёмкости СНЭ с учётом допустимой глубины разряда в рабочем цикле.

Для определения основных параметров СНЭ - номинальной мощности и номинальной энергоёмкости - необходимо разработать методику их расчёта.

СНЭ нашли и находят применения в различных сферах народного хозяйства. Они способны решать широкий спектр задач. Для каждой группы задач используются методики, разработанные специально для ее решения.

В [48] представлен метод выбора мощности и энергоёмкости СНЭ для эффективной интеграции ветропарков в электроэнергетическую систему, с точки зрения требований по компенсации изменений мощности ветропарка по отношению к мощности энергосистемы. Два основных требования интеграции ветроустановок в сеть заключаются в следующем: максимальное колебание мощности генератора ветротурбины за одну минуту составляет одну пятую номинальной мощности генератора ветротурбины; максимальное колебание мощности генератора ветротурбины за десять минут составляет две трети номинальной мощности выходной мощности ветрогенератора.

В [48] авторы сравнивают традиционный метод определения энергоёмкости (основанный на усреднении мощности, вырабатываемой ветропарком на заданном интервале времени с последующим расчетом требуемой энергоёмкости) и метод сегментации. Суть метода сегментации – замена средней линии мощности ветроустановки на отрезке сегментации наклонной линией, которая будет удовлетворять требованиям по работе ветропарка параллельно с сетью. Временной отрезок сегментации меньше, чем отрезок усреднения из традиционного метода. Сегментация выполняется таким образом, чтобы обеспечить требуемую минимально возможную энергоёмкость с использованием численных методов оптимизации. Метод позволяет уменьшить номинальную энергоёмкость СНЭ до 40% для расчетных примеров. Его недостатком можно считать то, что метод сравнивается с самым простым (традиционным) методом, на фоне которого результаты предложенного метода выглядят более эффективными. Назначение метода – поиск параметров СНЭ для решения задачи интеграции ВЭУ в сеть.

В [49] предлагается системный подход, направленный на поиск оптимальных условий работы (номинальная ёмкость, глубина цикла, величина тока заряда/разряда, температура, уровень заряда) системы накопления энергии на литиевых аккумуляторах. Цель – минимизировать нормированную стоимость хранения энергии (LCOS – Levelized Cost of Storage) на жизненном цикле СНЭ. LCOS – экономический показатель для оценки экономической эффективности СНЭ, показывает отношение суммы всех вложений за период срока службы СНЭ к кумулятивной генерируемой энергии СНЭ на всем сроке службы СНЭ.

На основе рассчитанной обменной энергоёмкости выполняется поиск оптимальных параметров СНЭ и режимов ее работы (критерий оптимальности минимум LCOS): полная энергоёмкость СНЭ, глубина разряда, тип электрохимии литий-ионных аккумуляторов (LiFePO_4 , $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), относительная величина токов заряда и разряда (C-rate), оптимальный диапазон уровня заряда, срок службы, измеряемый количеством рабочих циклов. Системный анализ проведён методами численного моделирования. Область применения метода –

поиск оптимальных параметров литий-ионных аккумуляторов на основе заданной обменной энергоёмкости для сетей с ВИЭ.

Метод динамического программирования для оценки энергоёмкости СНЭ предложен в [50]. Метод рассматривается на примере энергосистемы с большой долей выработки ВИЭ. Назначение метода – поиск такого значения энергоёмкости СНЭ, при котором обеспечивается стабильная работа энергосистемы (в том числе в аварийных и послеаварийных режимах). При этом энергоёмкость должна быть минимально необходимой для обеспечения с заданной вероятностью стабильной работы энергосистемы.

В [51] предлагается метод определения параметров СНЭ на основе генетического алгоритма (эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе) для применения СНЭ в микросетях.

С помощью генетических алгоритмов в статье решены задачи оптимизации режимов работы СНЭ и выбора ее параметров (мощность и энергоёмкость) при работе с микросетью, состоящей из ветроустановки, дизель-генераторов, микротурбины, топливной ячейки и СНЭ. Цель оптимизации – минимизация капитальных и операционных затрат на жизненном цикле проекта. Генетический алгоритм используется для одновременного построения нечетких правил и функций, которые составляют базу знаний экспертной системы. Экспертная система в свою очередь определяет требуемую мощность и энергоёмкость СНЭ. Назначение метода – поиск оптимальных, с экономической точки зрения, параметров СНЭ.

В [52] исследована взаимосвязь между объёмом генерации ВИЭ и параметрами накопителя энергии для изолированной энергосистемы с активными потребителями. Приведена методика выбора параметров СНЭ: мощности и энергоёмкости. Мощность и энергоёмкость накопителя рассчитываются, исходя из максимальной разности между номинальной мощностью источников генерации в изолированной системе и мощностью потребителей для рассматриваемого режима.

Назначение метода – поиск параметров СНЭ, которые дают минимальные ежегодные суммарные расходы в рассматриваемой энергосистеме. Были учтены следующие расходы: на топливо, дисконтированные инвестиционные затраты, затраты на недоотпуск электроэнергии вследствие недостаточности емкости накопителя, стоимость неиспользуемой (потерянной) энергии от ВИЭ в том случае, когда накопитель полностью заряжен.

В [53] рассматривается вопрос ресурсо- и энергосбережения в горной промышленности путем использования комбинированных дизельных энергосиловых установок с накопителями энергии. Комбинированные энергосиловые установки применяются для питания тяговых электроподвижных составов. Задача СНЭ - рекуперация энергии тягового подвижного состава, при этом повысив КПД установки, эффект ресурсосбережения, экологическую безопасность и энергоэффективность систем электроснабжения.

Для выполнения поставленной перед СНЭ задачи предложена методика выбора основных параметров СНЭ. Мощность рассчитывается по формуле, учитывающей скорость движения подвижного состава, тяговое усилие, КПД электрического привода, КПД СНЭ, мощность собственных нужд. Энергоемкость определяется из мощности подвижного состава; требуемое соотношение мощности и энергоемкости определено эмпирически и основано на практическом опыте применения СНЭ в подобных системах. На 1 МВт мощности должно приходиться от 2,7 до 4.44 кВт·ч (в зависимости от типа подвижного состава).

Достоинством предложенной методики является простота расчета. К недостаткам можно отнести отсутствие детального анализа режимов работы потребителей предприятия. По этой причине параметры СНЭ могут быть завышены, что приведет к снижению общего эффекта ресурсосбережения.

В [54] рассматривается расчет параметров накопителей энергии для солнечных электростанций при включении их в объединенную энергосистему. Задача СНЭ – повысить общую эффективность и надежность СЭС. Метод базируется на эмпирических формулах, полученных в ходе эксплуатации СЭС при подключении к сети. Необходимая емкость НЭ выбирается из следующих

требований: количество часов, когда СНЭ работает без подзарядки, суммарного тока фотопреобразователей, глубины разряда батареи, уменьшения её емкости при понижении температуры окружающей среды.

К достоинствам предложенной методики можно отнести простоту расчета. К недостаткам - отсутствие детального анализа условий и режимов работы СЭС и прилегающей сети. Метод дает большую погрешность, вследствие этого выбранные параметры могут быть далеки от оптимальных.

В [55] рассматриваются вопросы разработки методики выбора параметров накопителя энергии для оптимизации системы электроснабжения предприятия по экономическим параметрам. Задача СНЭ – снизить затраты предприятия на покупку электроэнергии и мощности. Задается желаемый график нагрузки предприятия, исходя из стоимостей электроэнергии и мощности. Мощность накопителя определяется по максимальной разнице между желаемым и существующим графиком нагрузки. В зависимости от потребляемой мощности строится график работы накопителя. Интегрирование зависимостей выдачи и потребления мощности СНЭ от времени позволяет определить требуемую энергоемкость системы накопления. На рассмотренном в статье примере виден положительный экономический эффект.

К достоинствам рассмотренного метода можно отнести простоту расчета. К недостаткам - отсутствие оптимизации желаемого графика нагрузки предприятия. В расчетном примере не учтено КПД СНЭ, которое в свою очередь уменьшает экономический эффект.

На основе выполненного анализа, можно сделать следующие выводы:

- Единой методики расчёта параметров СНЭ не существует. При решении конкретных задач, необходимо разрабатывать новые методики или адаптировать имеющиеся.
- Подавляющее число методик нацелено на определение параметров СНЭ для решения экономических задач. Самые распространенные типы задач – оптимизация совместной работы СНЭ и ВИЭ; использование СНЭ для управления спросом; использование СНЭ на рынке системных услуг; для ресурсосбережения и

повышения энергоэффективности. Методики определения параметров СНЭ для задач обеспечения требуемых технических параметров энергообъектов мало представлены в исследованиях.

- Отсутствуют методики для расчета параметров для группы задач в которых СНЭ работает в условиях резкопеременной нагрузки.
- Отсутствуют методики для расчета параметров, основывающиеся на расчётах электромеханических переходных процессов в энергосистеме со СНЭ при заданном алгоритме её работы.

5.2 Разработка методики расчета мощности и обменной энергоёмкости СНЭ

На современном уровне технологий наиболее эффективно применение СНЭ в узлах с резко переменным характером нагрузки, в изолированных системах электроснабжения, в микроэнергосистемах с нетрадиционными источниками энергии и на автономных электростанциях нефтегазодобывающих предприятий, где преобладают потребители со стохастически изменяющейся нагрузкой, броски мощности, которой соизмеримы с мощностью генераторных агрегатов.

В диссертации изложена методика расчёта основных параметров СНЭ и показана её реализация на трех характерных примерах:

- применение СНЭ для выравнивания графика нагрузки автономной электростанции;
- применение СНЭ для подавления и локализации низкочастотных колебаний (НЧК) режимных параметров в узлах нагрузки с резкопеременным характером изменения мощности;
- применение СНЭ для ограничения скорости изменения мощности.

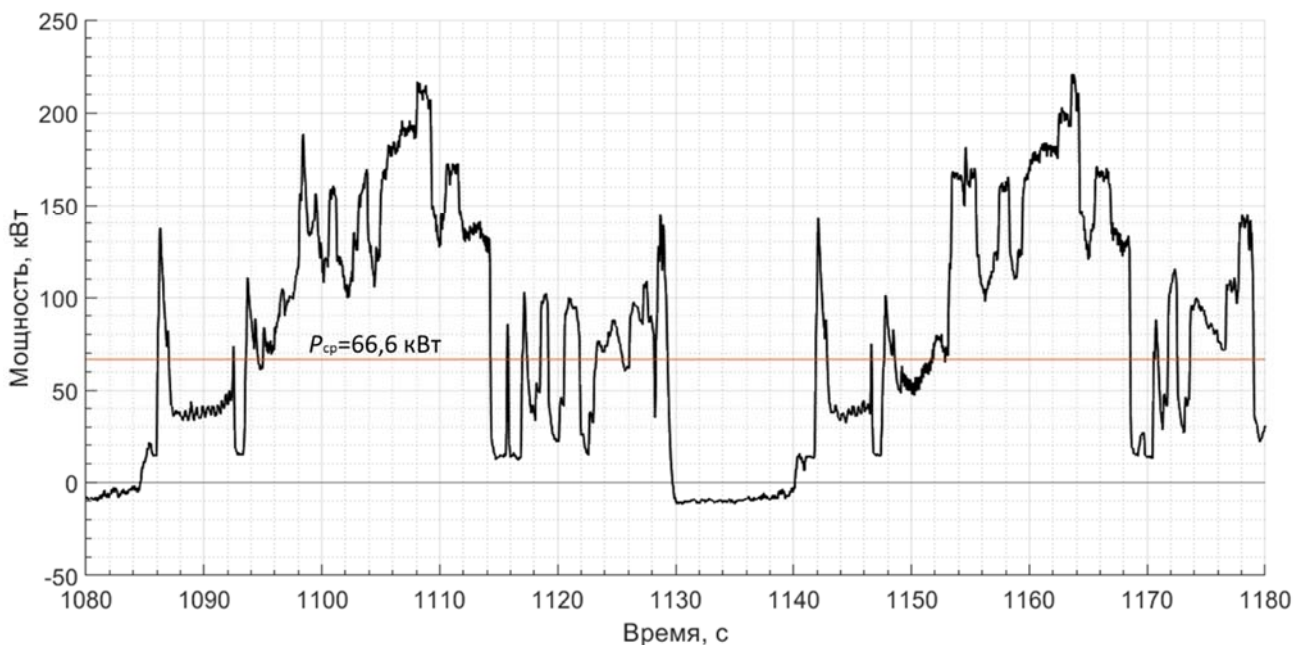
5.2.1 Расчёт параметров СНЭ для автономной электростанции промышленного объекта

Общепринятый подход при проектировании автономной электростанции заключается в выборе генераторного агрегата (ГА) на расчётную мощность, которая, как правило, значительно превышает среднюю мощность нагрузки. При

низком значении коэффициента использования установленной мощности ГА значительно возрастает удельный расход топлива, что существенно снижает экономические показатели автономной электростанции. Применение СНЭ в такой системе электроснабжения позволяет значительно повысить её технико-экономические показатели.

На рисунке 5.1 приведён характерный фрагмент нагрузочной диаграммы автономной электростанции подъёмного крана, полученной в ходе пассивного эксперимента в нормальном технологическом режиме работы – при перегрузке сыпучего груза [56]. При номинальной мощности электростанции – 300 кВт, средняя мощность нагрузки составляет 66 кВт ($K_{ИУМ}=22\%$).

Подобный характер нагрузки является обычным для всех подъёмно-транспортных механизмов циклического действия. Кроме снижения качества электроэнергии работа генераторного агрегата (ГА) в таком режиме сопровождается значительным увеличением удельного расхода топлива (до 40% относительно номинального режима) [56].



чёрная линия – нагрузочная диаграмма, оранжевая – среднеарифметическое значение нагрузки

Рисунок 5.1 – Фрагмент нагрузочной диаграммы автономной

электростанции подъёмного крана

Включение в состав энергосистемы СНЭ позволяет кардинально пересмотреть параметры, характеристики и режимы работы её основного силового оборудования, в том числе её состав и структуру [57]. Основным при этом является вопрос выбора параметров СНЭ: мощности и энергоёмкости [57]. Выбор этот определяется, прежде всего, назначением СНЭ.

Одна из перспективных стратегий применения накопителя энергии в составе автономной электростанции – замена «штатного» ГА, выбранного по традиционной методике, на агрегат с мощностью близкой к среднему значению мощности нагрузочной диаграммы. Регулирование переменной части нагрузочной диаграммы должно выполняться с помощью накопителя. ГА в этом случае работает с постоянной мощностью, равной средней мощности нагрузки за рабочий цикл. При этом достигается комплексный эффект: минимальный удельный расход топлива, минимальная стоимость ГА, минимальные издержки на его обслуживание, увеличение моторесурса приводного двигателя, снижение потерь в генераторе от переходных процессов, обусловленных резко переменной нагрузкой [58,59].

В случае же применения ГА с газопоршневыми приводными двигателями, которые не допускают резких изменений нагрузки, применение накопителей даёт ещё больший эффект за счёт ограничения с помощью СНЭ скорости изменения мощности ГПУ при бросках нагрузки.

В основу предлагаемого метода положен гармонический анализ графика нагрузки (нагрузочной диаграммы), позволяющий выявить его наиболее значимые гармоники, которые подлежат подавлению (компенсации) с помощью СНЭ. Оставшиеся после этого гармоники графика нагрузки должны иметь такие частоты и амплитуды чтобы штатные регуляторы режимных параметров и автоматика были способны их «отработать».

Как правило, графики нагрузки (особенно, в случае резко переменной нагрузки) не относятся к периодическим функциям. Они имеют стохастический, резко переменный характер. Для их анализа применим гармонический анализ,

выполненный методом быстрого преобразования Фурье для неперiodической функции, который даёт бесконечный ряд гармоник.

Наиболее значимые гармоники графиков резко переменной нагрузки в большинстве случаев сосредоточены в частотном диапазоне от 0,1 до 0,8 Гц (Рисунок 5.2), что подтверждается Рисунок 5.3, на котором приведена нагрузочная диаграмма без учёта гармоник выше 0,8 Гц. Она в основном повторяет абрис исходной нагрузочной диаграммы (рисунок 5.1), в которой присутствует полный спектр гармоник.

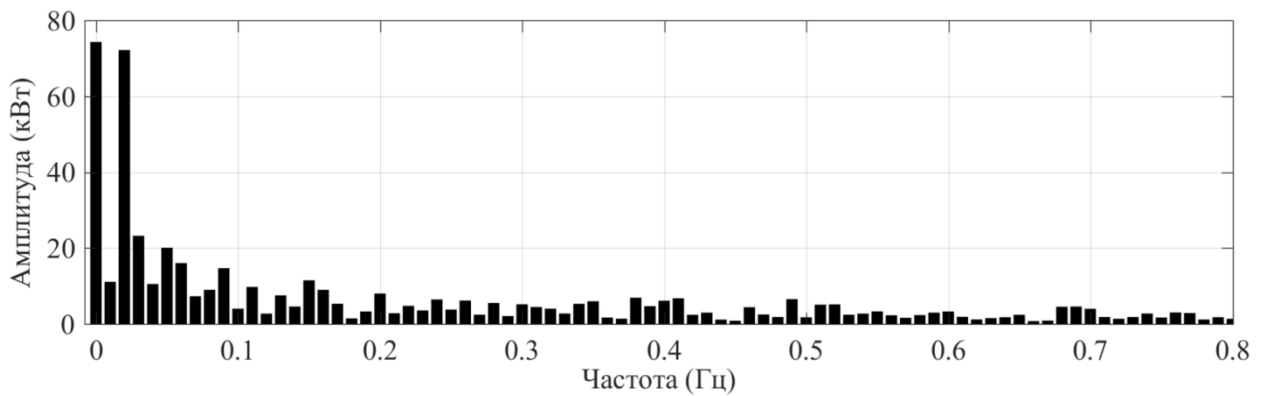
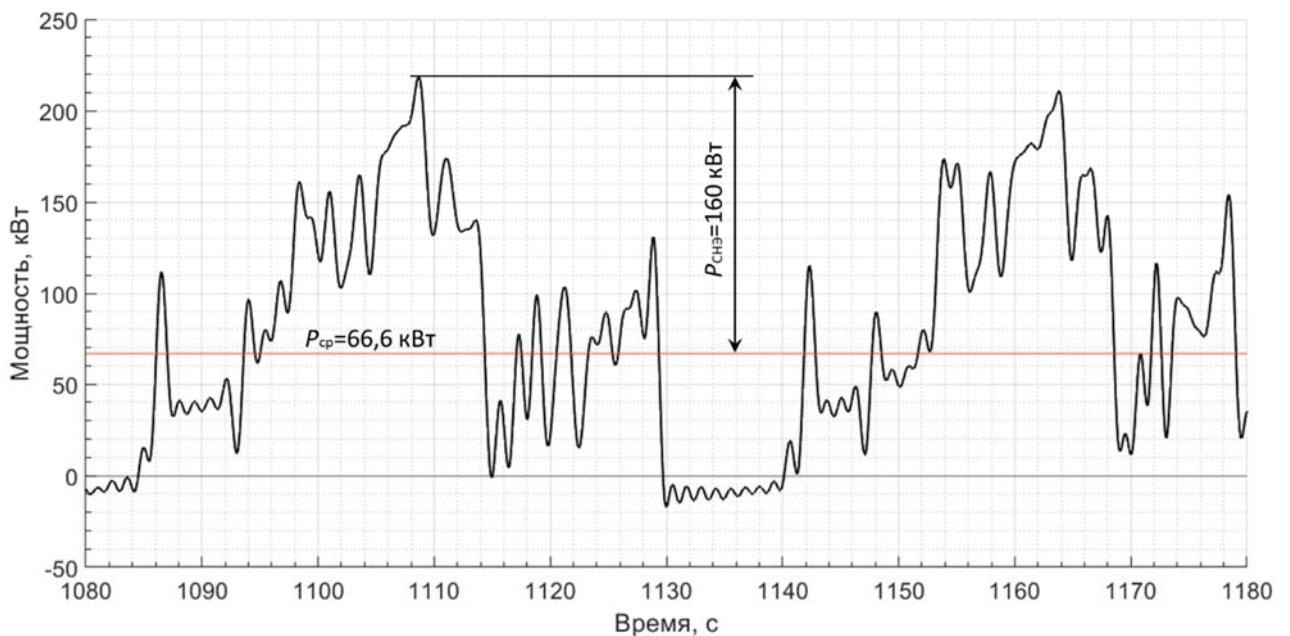


Рисунок 5.2 – АЧХ нагрузочной диаграммы плавкрана



черная линия – нагрузочная диаграмма без учёта гармоник выше 0,8 Гц, оранжевая – среднеарифметическое значение нагрузки

Рисунок 5.3 – Нагрузочная диаграмма без учёта гармоник выше 0,8 Гц

Результаты гармонического анализа нагрузочной диаграммы позволяют рассчитать параметры накопителя энергии в зависимости от амплитуды и частоты тех гармоник, которые подлежат подавлению (компенсации).

В рассматриваемом примере минимально необходимая мощность накопителя $P_{\text{нак}}$ определяется из нагрузочной диаграммы как наибольшее отклонение мощности от среднего значения. Как следует из рисунка 5.3 – $P_{\text{СНЭ}} = 160 \text{ кВт}$.

Для определения энергоёмкости необходимо построить диаграмму изменения энергии накопителя, которой он должен обмениваться с энергосистемой для поддержания постоянства мощности генератора (рисунок 5.3). Максимальный размах кривой зависимости энергии от времени показывает минимально необходимую величину обменной энергоёмкости $W_{\text{обм}}$. Определить номинальную энергоёмкость накопителя $W_{\text{н}}$ возможно только после выбора типа накопителя, учитывая особенности конкретной технологии накопления энергии, которая определяет допустимую глубину разряда накопительного элемента при сохранении достаточной величины располагаемой мощности. В рассматриваемом примере в соответствии с диаграммой (рисунок 5.4) обменная энергоёмкость накопителя $W_{\text{обм}}$ должна быть не менее 0.8 кВт·час или 2,88 МДж.

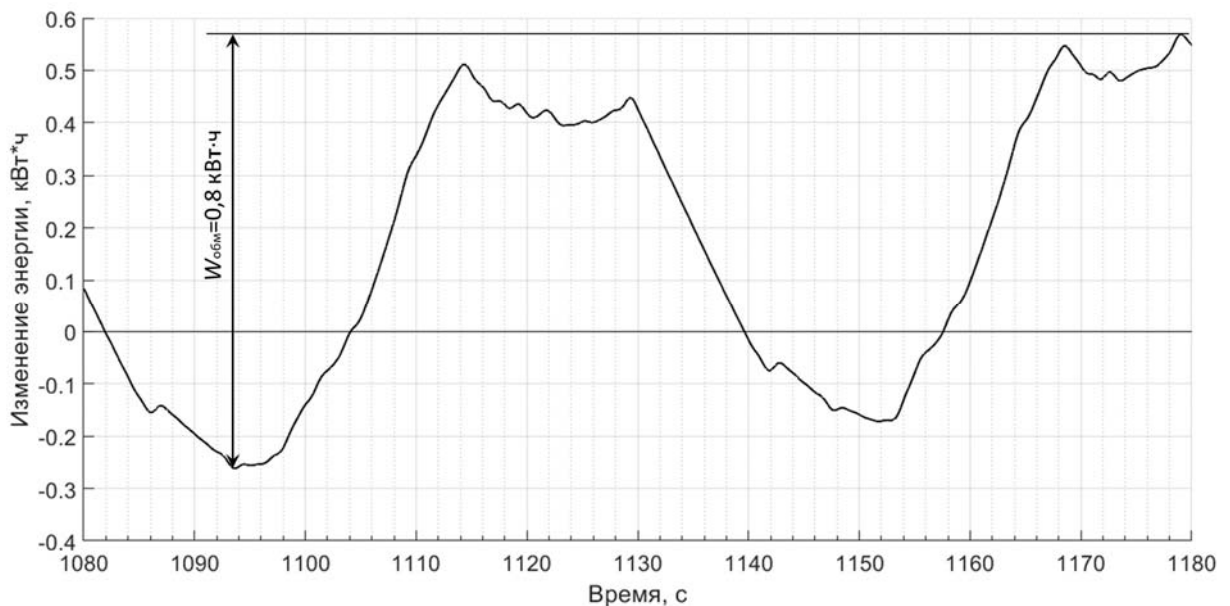


Рисунок 5.4 – Диаграмма изменения энергии накопителя в процессе управления

Таким образом на основании анализа графика нагрузки рассчитаны основные параметры СНЭ – мощность не менее 160 кВт, обменная энергоемкость не менее 0.8 кВт·час.

Изложенная методика наиболее эффективна для автономных энергосистем с единственной электростанцией относительно небольшой мощности, работающей на резкопеременную нагрузку, с низким значением $K_{иум}$.

5.2.2 Расчёт параметров накопителя энергии для демпфирования НЧК в узлах нагрузки с резко переменным характером потребления

В объединённых энергосистемах резко переменная нагрузка провоцирует и усиливает низкочастотные колебания (НЧК) режимных параметров [60]. Одним из наиболее негативных последствий развития НЧК является нарушение колебательной устойчивости энергосистемы [61]. В связи с этим уменьшение влияния НЧК на энергосистему является важной задачей, которая эффективно может быть решена с помощью СНЭ.

На рисунке 5.5 приведён фрагмент нагрузочной диаграммы одного из каменноугольных разрезов Новосибирской области, полученной в процессе пассивного эксперимента в нормальном технологическом режиме работы. Основные потребители электроэнергии – карьерные экскаваторы с электроприводом мощностью около 1 МВт, которые получают питание от энергосистемы через подстанцию 35/6 кВ.

На рисунке 5.6 приведены результаты гармонического анализа нагрузочной диаграммы без учёта постоянной составляющей. Наиболее значимые колебания АЧХ сосредоточены в частотном диапазоне от 0,1 до 2,0 Гц. Это подтверждается рисунком 5.7, на котором приведена нагрузочная диаграмма без учёта колебаний мощности выше 2,0 Гц. Она в основном повторяет исходную нагрузочную диаграмму.

На рисунке 5.8 представлена суммарная диаграмма мощности гармоник в диапазоне 0,1 – 2,0 Гц, полученная из нагрузочной диаграммы каменноугольного разреза путём фильтрации указанных гармоник. Эту диаграмму должен

«отрабатывать» накопитель в процессе подавления колебаний мощности нагрузки.

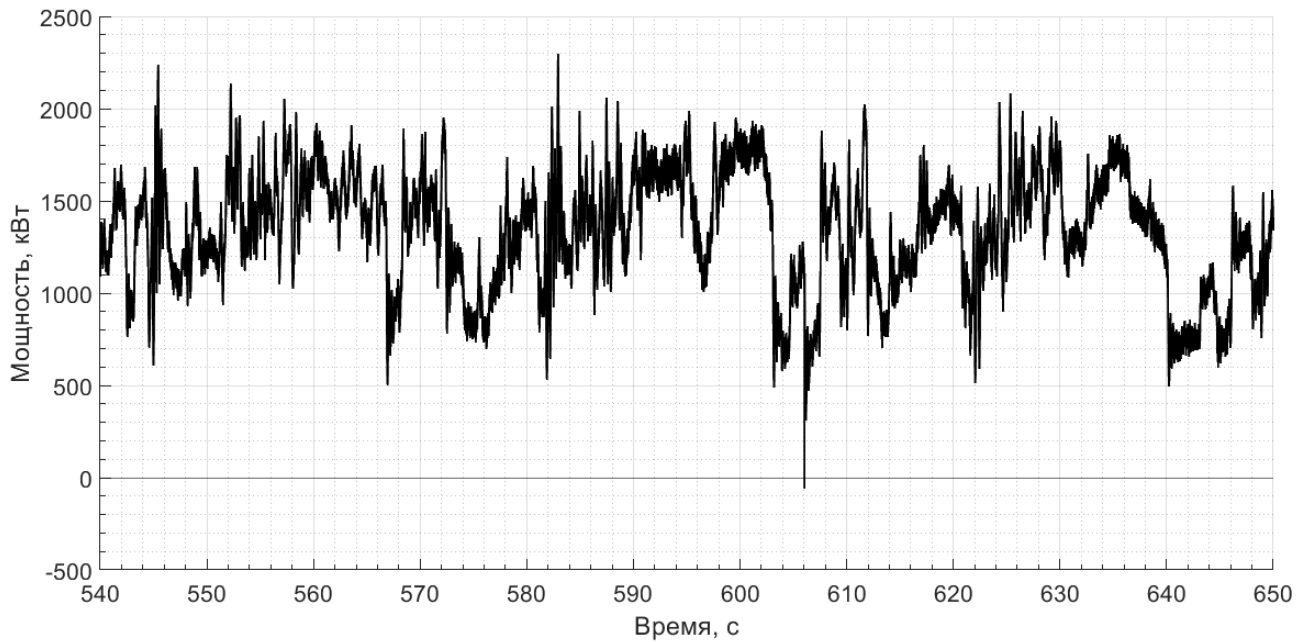


Рисунок 5.5 – Фрагмент нагрузочной диаграммы каменноугольного разреза

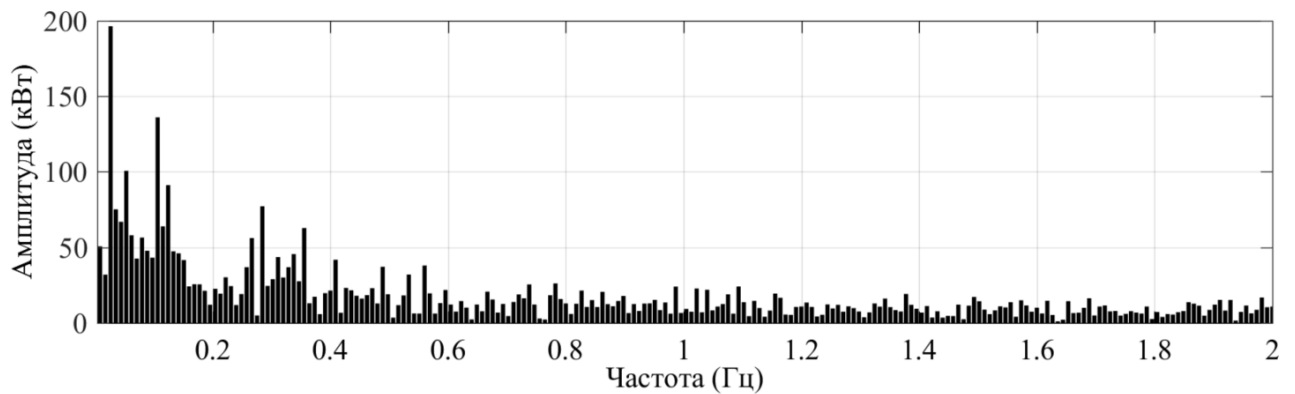


Рисунок 5.6 – АЧХ нагрузочной диаграммы каменноугольного разреза (без постоянной составляющей)

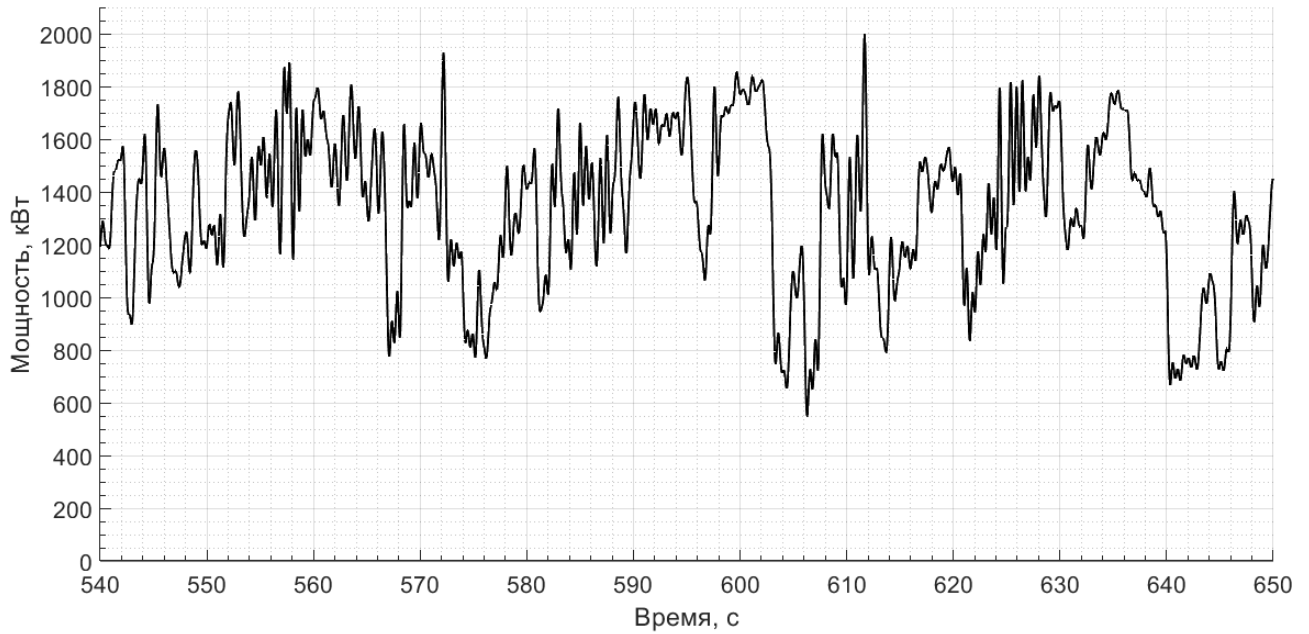


Рисунок 5.7 – Нагрузочная диаграмма без учёта гармоник выше 2,0 Гц

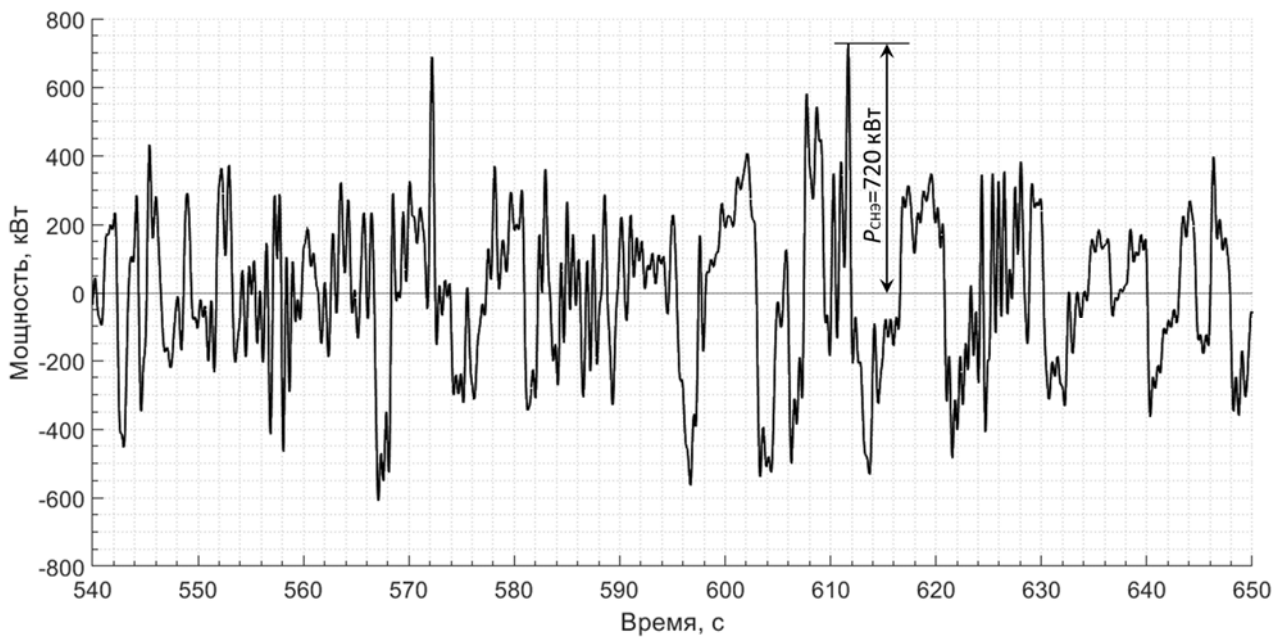


Рисунок 5.8 – Диаграмма мощности накопителя с учётом гармоник в диапазоне 0,1 – 2,0 Гц

Минимально необходимая мощность накопителя энергии определяется по наибольшему отклонению кривой мощности от нулевого значения (рисунок 5.9) и составляет $P_{CHЭ} = 720$ кВт.

Для определения энергоёмкости строится диаграмма изменения энергии накопителя, которой он должен обмениваться с энергосистемой для подавления

гармоник диапазона 0,1 – 2,0 Гц (рисунок 5.9). Максимальный размах диаграммы, показывающей изменение накопленной в накопителе энергии, равен минимально необходимой величине обменной энергоёмкости $W_{обм} = 0,66 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ (2,38 МДж).

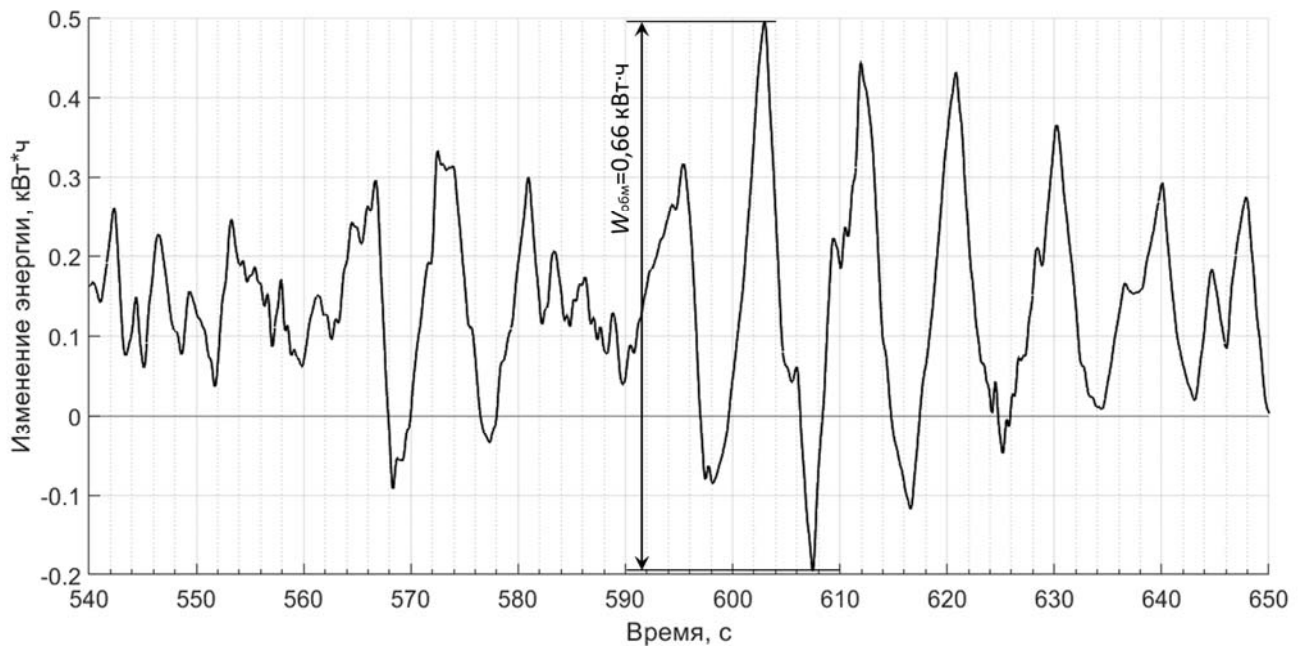


Рисунок 5.9 – Диаграмма изменения накопленной энергии накопителя в процессе управления

На рисунке 5.10 показан переток мощности по линии электропередачи от энергосистемы к каменноугольному разрезу с учётом действия накопителя энергии. В этом перетоке присутствуют гармоники нагрузочной диаграммы с частотами менее 0,1 Гц и более 2,0 Гц. Частоты менее 0,1 Гц «отрабатываются» регуляторами энергосистемы, а более 2,0 Гц – «фильтруются» её инерционностью.

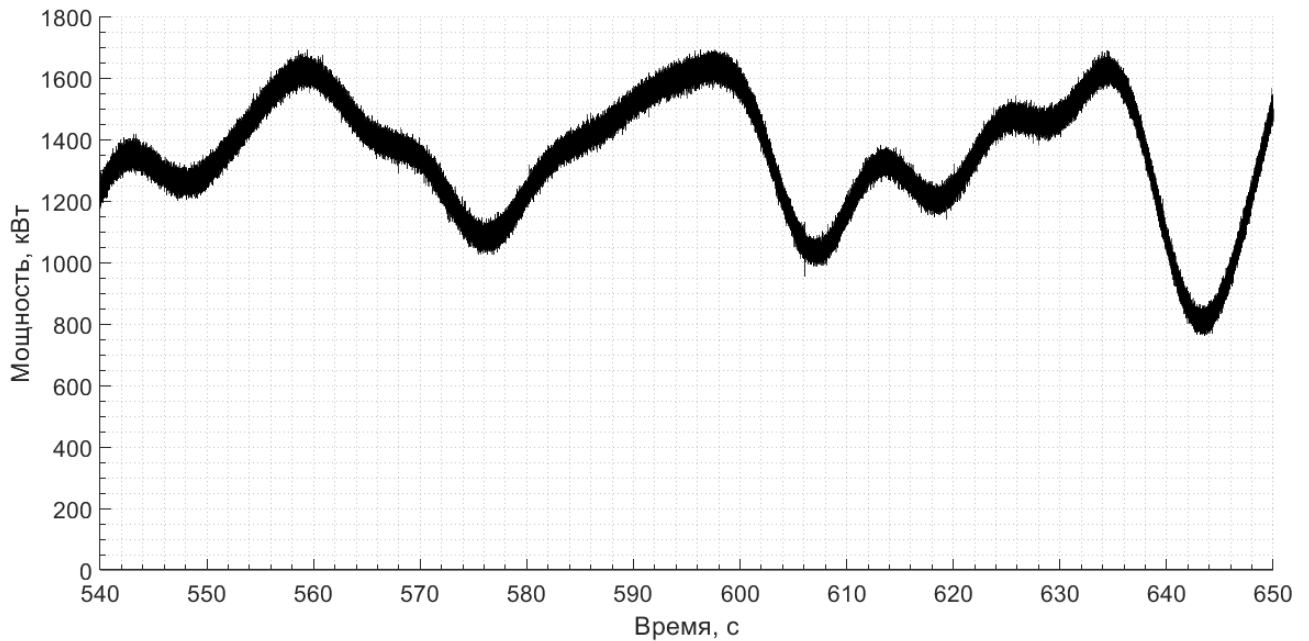


Рисунок 5.10 – Переток мощности по линии электропередачи от энергосистемы к каменноугольному разрезу с учётом действия накопителя энергии

Таким образом, СНЭ с рассчитанными выше параметрами, способна решить задачу локализации НЧК режимных параметров в узле нагрузки, не позволяя им «раскачивать» энергосистему в целом.

Использование предложенной методики даёт наибольший эффект в случае применения СНЭ в узлах с резкопеременной нагрузкой значительной мощности, получающих питание по тупиковым линиям электропередачи, а также для объектов распределённой генерации, имеющих слабую связь с энергосистемой.

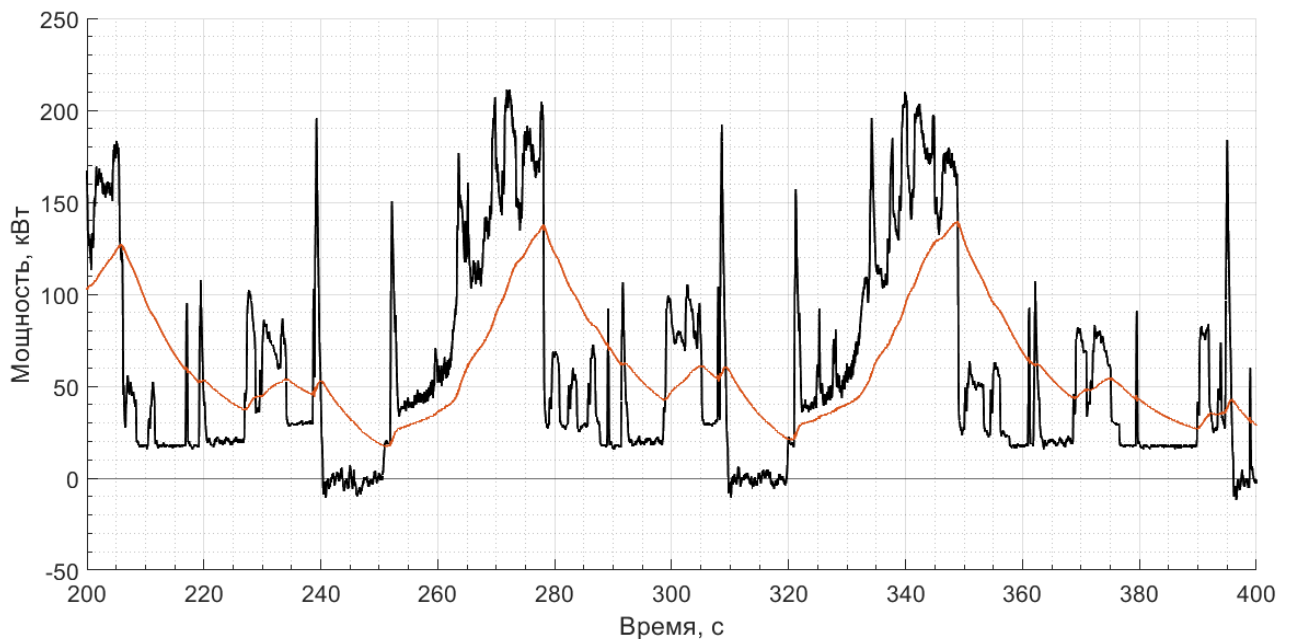
5.2.3 Расчёт параметров СНЭ на основе расчета переходного процесса при заданном алгоритме управления

Для расчёта параметров СНЭ, решающей задачу ограничения скорости изменения мощности генератора при его работе на резко переменную нагрузку, не требуется гармонический анализ графика нагрузки и выбор параметров проводится по сокращённой процедуре на основе расчетов переходных процессов с использованием математической модели СНЭ. При этом в модель системы управления СНЭ должен быть заложен алгоритм ограничения скорости изменения

мощности. В результате моделирования должны быть получены зависимости изменения мощности и запасённой энергии СНЭ от времени. На их основе выполняется расчет параметров СНЭ в следующей последовательности:

1. Задаются заведомо избыточные для решаемой задачи (на несколько порядков превышающие ожидаемые значения) мощность и номинальная энергоёмкость СНЭ. Это делается для того, чтобы при первичном расчете режимные параметры СНЭ не выходили на ограничения по основным параметрам.

2. Производится расчет переходного процесса. При расчете необходимо задать график нагрузки и максимально допустимую скорость изменения мощности СНЭ (в приведённом примере она равна 10 кВт/с). Пример переходного процесса показан на рисунке 5.11. График нагрузки носит резко переменный, циклический характер. Алгоритм управления СНЭ обеспечивает плавное изменение мощности генератора, тем самым уменьшая вероятность аварийного отключения генератора из-за скачков мощности нагрузки.



черная линия – мощность нагрузки, оранжевая – мощность генератора

Рисунок 5.11 –Переходный процесс при работе генератора на резко переменную нагрузку с применением СНЭ для ограничения скорости изменения мощности генератора

3. При расчете переходного процесса строятся графики изменения мощности (см. рисунок 5.12) и запасенной энергии СНЭ (см. рисунок 5.13).

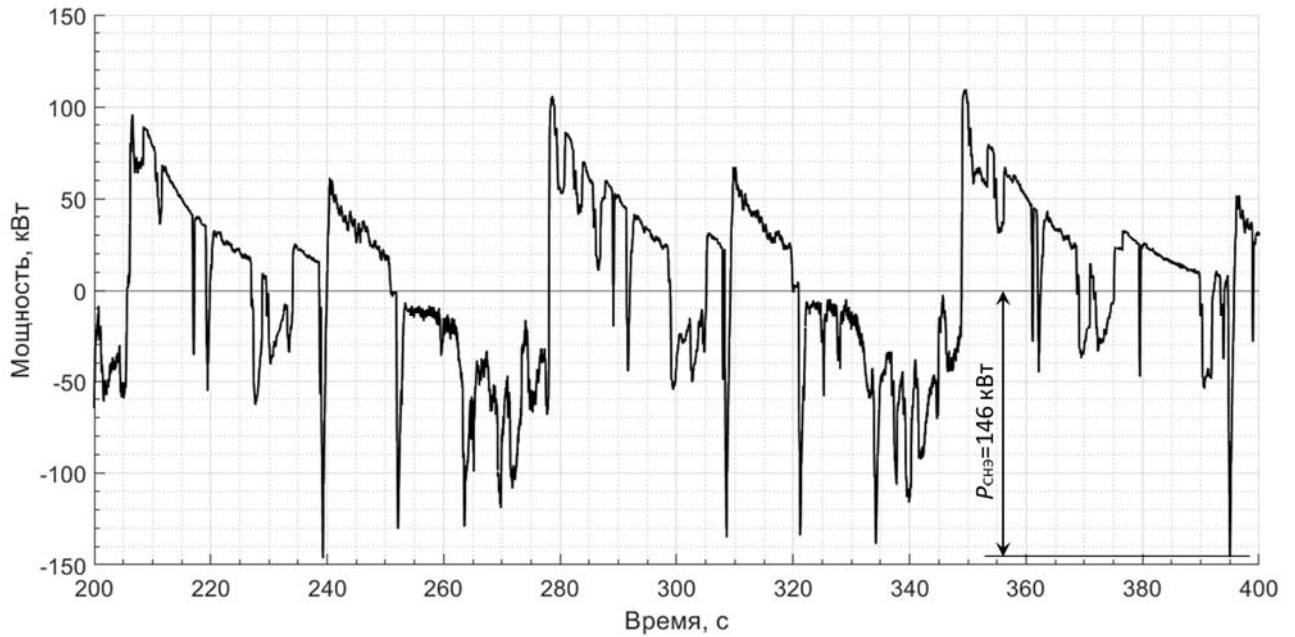


Рисунок 5.12– Мощность СНЭ при реализации алгоритма ограничения скорости изменения мощности генераторного агрегата

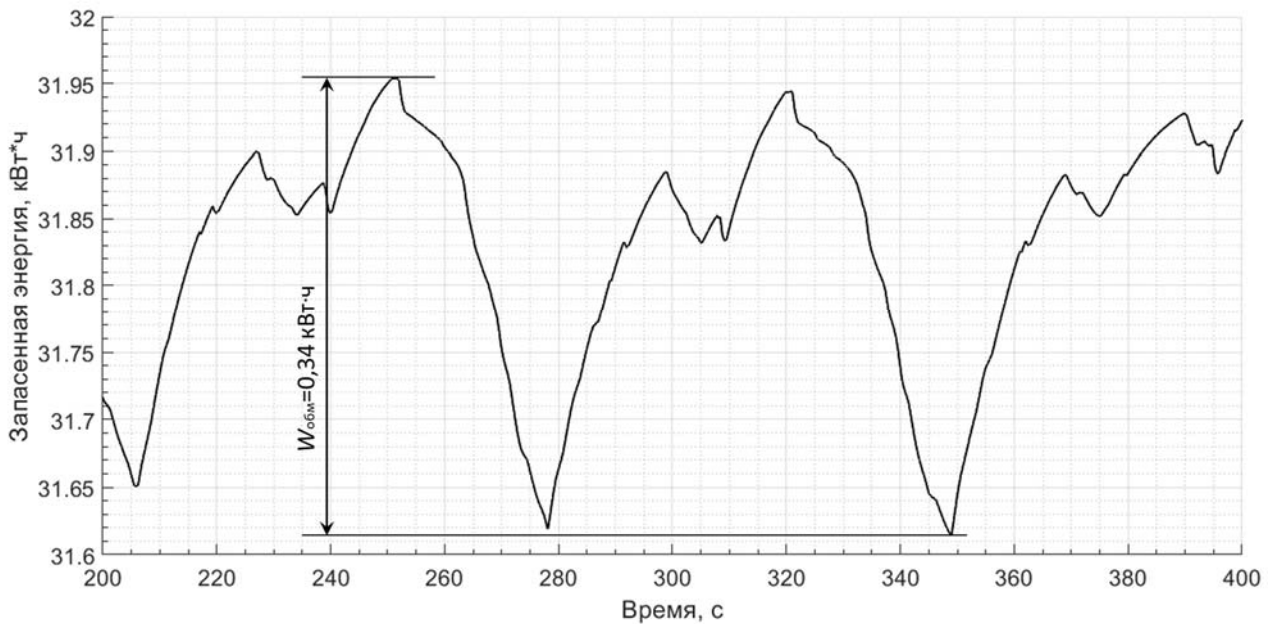


Рисунок 5.13 – Изменение запасенной энергии в СНЭ при реализации алгоритма ограничения скорости изменения мощности генераторного агрегата

4. Для определения мощности СНЭ необходимо по диаграмме мощности (рисунок 5.12) выбрать её максимальное значения по модулю. В данном примере эта величина равна 146 кВт.

5. Для определения обменной энергоемкости необходимо взять разницу между максимальным и минимальным значением запасённой энергии СНЭ (рисунок 5.13). В рассматриваемом примере она равна: $31,95 - 31,61 = 0,34$ кВт·ч.

Таким образом, для рассмотренного примера для поддержания требуемой скорости изменения мощности (10 кВт/с) необходима СНЭ со следующими параметрами:

Мощность – 146 кВт.

Обменная энергоемкость – 0,34 кВт·ч.

Из графиков переходных процессов следует, что длительность одного цикла СНЭ составляет около 120 – 140 секунд. С учетом 12 часовой рабочей смены и 250 рабочих дней в году, СНЭ должна обеспечить не менее 90 000 таких циклов в год. При желаемом сроке службы СНЭ равным 10 годам, количество циклов увеличивается до 900 000. Для обеспечения требуемого срока службы, необходимо рассчитать номинальную энергоемкость СНЭ, методика расчета которой приведена в параграфе 5.3.

Методика предназначена для выбора основных параметров СНЭ по результатам расчёта переходного процесса при заданном алгоритме управления мощностью накопителя с учетом изменения его уровня заряда в процессе энергообмена с системой.

5.2.4 Процедура выбора мощности и обменной энергоемкости СНЭ

Для задач СНЭ, которые требуют подавления определенных колебаний мощности (см. параграфы 5.2.1, 5.2.2), методику расчета мощности и обменной энергоемкости СНЭ можно свести к следующей процедуре:

1. Провести экспериментальное исследование нагрузочной диаграммы ГА (или узла нагрузки) в расчётном рабочем режиме.
2. Провести гармонический анализ нагрузочной диаграммы.

3. Выявить гармоники, подлежащие подавлению.
4. Построить диаграмму мощности подлежащих подавлению гармоник.
5. По диаграмме (п. 4) по максимальному отклонению мощности от среднего (или нулевого – в зависимости от решаемой задачи) значения определить минимально необходимую мощность накопителя $P_{\text{СНЭ}}$.
6. По диаграмме (п. 4) построить диаграмму изменения энергии накопителя.
7. По наибольшей разности между максимальным и минимальным значениями энергии по диаграмме (п. 6) определить обменную энергоёмкость накопителя $W_{\text{обм}}$.

Для задач СНЭ, которые требуют расчета переходного процесса с использованием математической модели СНЭ (см. параграф 5.2.3) при заданном алгоритме управления, методика расчета мощности и обменной энергоёмкости несколько видоизменяется за счёт того, что отпадает необходимость в проведении гармонического анализа:

1. Рассчитать переходные процессы в энергосистеме с применением соответствующих алгоритмов управления СНЭ. При этом мощность и номинальная энергоёмкость СНЭ должны быть избыточны на несколько порядков (например, бесконечная мощность и энергоёмкость).
2. На основе рассчитанных переходных процессов, построить диаграмму изменения мощности СНЭ во времени.
3. По диаграмме (п. 2) по максимальному отклонению мощности СНЭ от нулевого значения определить минимально необходимую мощность накопителя $P_{\text{СНЭ}}$.
4. По диаграмме изменения мощности СНЭ (п. 2) построить диаграмму изменения энергии накопителя.
5. По наибольшей разности между максимальным и минимальным значениями энергии по диаграмме (п. 4) определить обменную энергоёмкость накопителя $W_{\text{обм}}$.

5.3 Расчет номинальной энергоёмкости СНЭ

В параграфе 5.2 описаны методики расчета основных параметров СНЭ для ряда задач. Они позволяют рассчитать два основных параметра: значение номинальной мощности и обменную энергоёмкость. Обменная энергоёмкость характеризует тот объём энергии, которым СНЭ должен обмениваться с энергосистемой для решения поставленной задачи управления. Обменная энергоёмкость является исходным параметром для расчёта номинальной энергоёмкости. Номинальная энергоёмкость может значительно превышать обменную. Это зависит от типа аккумулирующего элемента, технологических ограничений, которые на него накладываются, от к.п.д. и постоянной саморазряда, от допустимого количества циклов заряд/разряд, от допустимой глубины разряда и ряда других параметров.

В настоящее время СНЭ на базе ЛИА по количеству действующих и проектируемых установок получили наибольшее распространение в электроэнергетике всего мира. Поэтому в диссертации рассматривается применение методики расчета номинальной энергоёмкости СНЭ на базе ЛИА.

Номинальная энергоёмкость СНЭ рассчитывается с учётом выполнения двух условий:

1. Она должна иметь такое значение, при котором обеспечивается способность ЛИА выдать/потребить требуемую мощность.
2. Она должна быть такой, чтобы при заданном значении обменной энергоёмкости глубина разряда СНЭ позволяла бы обеспечить требуемый срок службы (в циклах) ЛИА.

Наибольшее из этих значений должно быть принято в качестве номинальной энергоёмкости СНЭ.

5.3.1 Определение минимальной энергоемкости для обеспечения требуемой мощности СНЭ

Мощность СНЭ ограничена не только номинальной мощностью преобразователя, но и номинальным током аккумуляторов. Аккумуляторы должны обеспечить выдачу/потребление тока, который соответствует требуемой (рассчитанной) мощности СНЭ.

Расчет выполняется в следующей последовательности:

- 1) Рассчитывается максимальная возможная мощность, требуемая от АКБ.

Такой режим возможен при выдаче мощности (режим разряда):

$$P_{\text{АБ}} = \frac{P_{\text{СНЭ}}}{\eta_{\text{пп/тр}}} \quad (5.1)$$

где $\eta_{\text{пп/тр}}$ – общий КПД подсистемы преобразования СНЭ (двунаправленный преобразователь, фильтр) и силового трансформатора. Значения КПД приводятся в документации на силовое оборудование. Обычно оно находится в диапазоне 0,91 – 0,96;

$P_{\text{СНЭ}}$ – мощность СНЭ [кВт], рассчитанная по методике, изложенной в параграфе 5.2.

- 2) Определяется минимальная энергоемкость подсистемы накопления для обеспечения требуемой мощности:

$$W_1 = P_{\text{АКБ}} \cdot T_{\text{з./р.}} \quad (5.2)$$

$T_{\text{з./р.}}$ – минимальное возможное время полного заряда/разряда полностью разряженного/заряженного аккумулятора максимальным током $I_{\text{макс}}$ без ухудшения эксплуатационных свойств аккумулятора. Единица измерения – час. Для современных ЛИА минимальное время заряда/разряда составляет от 0,2 часов (12 минут) до 1 часа (60 минут) (зависит от применяемой технологии и завода изготовителя) [30]. $T_{\text{з./р.}}$ рассчитывается из паспортных данных аккумулятора:

$$T_{\text{з./р.}} = \frac{C}{I_{\text{макс}}} \quad (5.3)$$

C – емкость аккумулятора, [А·ч].

$I_{\text{макс}}$ – максимальный ток заряда/разряда, [А].

Схема сборки ЛИА в АКБ (последовательное, параллельное, последовательно-параллельное) не будет влиять на количество аккумуляторов необходимых для обеспечения максимальной мощности АКБ ($P_{\text{АКБ}}$). Каждый отдельный аккумулятор обладает своими единичными параметрами (энергоемкость, максимальный ток заряда/разряда и т.п.). Для каждой модели ЛИА минимальное возможное время заряда/разряда, а как следствие и максимальная мощность заряда/разряда аккумулятора определяются его паспортными параметрами. Соотношение между максимальной мощностью заряда и энергоемкостью аккумулятора постоянно для каждой модели ЛИА. Таким образом, энергоемкость, которая должна обеспечить требуемую мощность, определяется из соотношения мощности и энергоёмкости конкретной модели аккумулятора по паспортным данным.

Точное определение количества аккумуляторов в последовательно-параллельных ветвях выполняется на этапах проектной и предпроектной работы, уже с привязкой к реальному и конкретному оборудованию (аккумуляторы, преобразователь, трансформатор). При точном расчете с привязкой к реальному оборудованию значение энергоемкости может незначительно измениться.

W_1 – энергоемкость, рассчитанная по описываемому условию, обеспечивает выдачу/потребление мощности, определенной на первоначальном этапе расчета параметров СНЭ.

5.3.2 Расчет минимально необходимой энергоемкости, требуемой для выполнения заявленных функций и срока службы СНЭ

Для расчета энергоемкости подсистемы накопления, которая обеспечит требуемый срок службы (в циклах) ЛИА, необходимы следующие данные:

1. Расчётная обменная энергоемкость подсистемы ($W_{\text{обм}}$).
2. Коэффициент полезного действия СНЭ ($\eta_{\text{СНЭ}}$) - указывается производителем (при оценочных расчётах допустимо принимать его значение в диапазоне 0,91–0,95).

3. Расчётный срок службы СНЭ (количество циклов заряд/разряд или продолжительность эксплуатации в годах).
4. Зависимость числа циклов заряд/разряд от глубины разряда (рисунок 5.14) – приводится производителем или строится по экспериментальным данным.

Под глубиной разряда ($K_{г.р.}$) понимается отношение обменной энергоемкости к номинальной энергоемкости СНЭ с учетом потерь мощности при энергообмене. Другими словами, $K_{г.р.}$ - величина, показывающая долю энергии от номинальной энергоемкости СНЭ, которая задействована в энергообмене между СНЭ и энергосистемой. Определяется выражением:

$$K_{г.р.} = \frac{W_{обм}}{W_{ном} \cdot \eta_{СНЭ}} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

где $\eta_{СНЭ}$ – общий КПД СНЭ (учитывает КПД двунаправленного преобразователя, фильтра, ЛИА и силового трансформатора). Значения КПД приводятся в документации на силовое оборудование. Обычно оно находится в диапазоне 0,91 – 0,95.

$W_{ном}$ – номинальная энергоемкость СНЭ [кВт·ч].

Если для решения задачи необходимо обеспечить значительный срок службы СНЭ (более 10 000 циклов), то необходимо принять глубину разряда не более 15-25% (в зависимости от производителя ЛИА). Для ЛИА с такой глубиной разряда срок службы в циклах не нормируется, а определяется в годах только условиями хранения, эксплуатации и естественным старением. Для современных ЛИА при эксплуатации в нормальных условиях с такой глубиной разряда срок службы составляет от 8 до 20 лет.

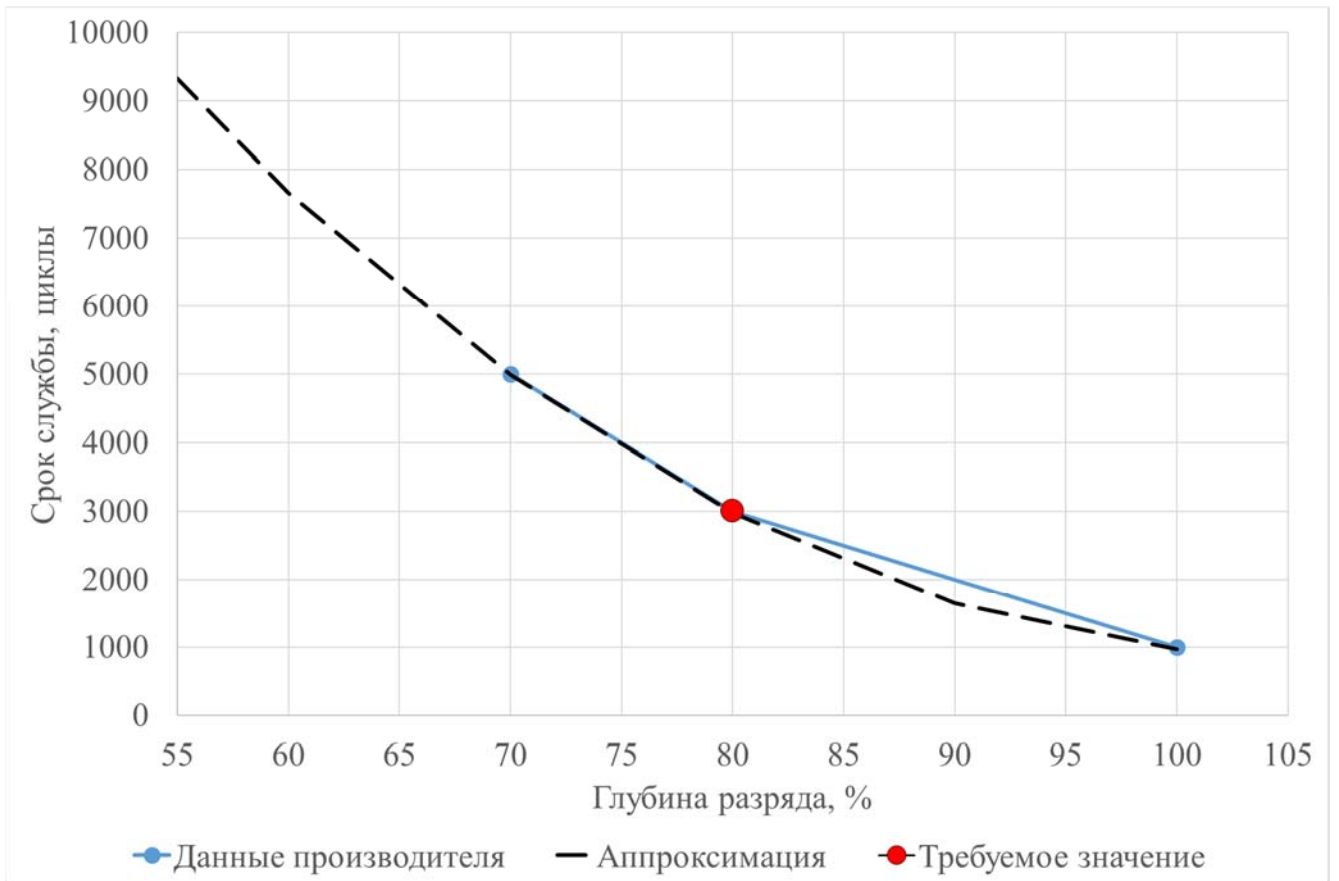


Рисунок 5.14 – Пример зависимости срока службы в циклах от глубины разряда литий-ионных аккумуляторов

Учитывая требуемый срок службы СНЭ (см. рисунок 5.14), определить расчетную глубину разряда ($K_{г.р.}$). После определения расчетной глубины разряда рассчитывается конечная энергоемкость СНЭ используя выражение:

$$W_2 = \frac{W_{обм}}{K_{г.р.} \cdot \eta_{СНЭ}} \cdot 100 \quad (5.5)$$

W_2 – энергоемкость, рассчитанная по рассматриваемому условию, обеспечивает требуемую величину энергообмена и срок службы (в количестве циклов или в годах).

5.3.3 Окончательный расчет номинальной энергоемкости СНЭ

По результатам расчетов энергоемкостей W_1 и W_2 (выражения 5.2 и 5.5) определяется номинальная энергоемкость СНЭ:

$$W_{ном} = \max\{W_1; W_2\} \quad (5.6)$$

Рассчитанное таким способом значение номинальной энергоёмкости обеспечивает не только необходимое для требуемого энергообмена количество энергии, но и желаемый срок службы СНЭ.

Выводы по главе 5

Выполнен анализ методик расчета параметров СНЭ из открытых источников. Показаны их недостатки.

Предложены методики расчета основных параметров СНЭ:

- Методика расчета параметров СНЭ для автономной электростанции промышленного объекта
- Методика расчета параметров накопителя энергии для демпфирования колебаний мощности в узлах нагрузки с резко переменным характером потребления;
- Методика расчета параметров СНЭ для ограничения скорости изменения мощности генераторного агрегата.

Разработанные методики легко адаптируются для расчета параметров СНЭ при решении других задач.

ГЛАВА 6 ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТОК АВТОРА ДИССЕРТАЦИИ В ПРАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОИЗВОДСВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

6.1 Натурные испытания СНЭ в динамических режимах

В главе приведены результаты испытаний промышленного образца системы накопления энергии (СНЭ-10-1200-400) номинальной мощностью 1200 кВ·А, энергоемкостью 400 кВт·ч и напряжением 10 кВ производства ООО «СНЭ» на базе литий-ионных аккумуляторных батарей. Натурные испытания проведены при совместной работе СНЭ в составе автономной электростанции и в составе системы электроснабжения промышленного предприятия, получающего электроэнергию от ЕЭС.

Цель испытаний – проверка работоспособности СНЭ в условиях максимально приближенным к эксплуатационным на объектах энергетики. Выбраны критерии для оценки успешной работы СНЭ:

- СНЭ должна отработать без сбоев, приводящих к аварийному отключению СНЭ;
- СНЭ должна выполнять возложенные на нее функции в течение всего времени испытаний в соответствии с выбранными алгоритмами управления.

Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в проведение испытаний, в том числе в части разработки программ и методик испытаний СНЭ-10-1200-400. При проведении испытаний были использованы разработки автора по моделированию СНЭ и методик расчета её параметров.

6.1.1 Натурные испытания СНЭ в составе автономной электростанции

Испытания выполнены ООО «СНЭ», ООО «СПТ» и Институтом силовой электроники НГТУ 24 мая 2019 года в Новосибирске. Испытания проводились с промышленным образцом СНЭ-10-1200-400 УХЛ1 мощностью 1200 кВ·А,

энергоемкостью 400 кВт·ч, номинальным напряжением 10 кВ, предназначенного для работы в составе автономной системы электроснабжения на базе ГПУ (рисунок 6.1) [62]. Цель испытания – проверка работоспособности СНЭ для обеспечения стабильной работы генерирующего оборудования при работе в составе автономной электростанции.



Рисунок 6.1 – Экспериментальная установка для испытаний совместной работы СНЭ-10-1200-400 и ГПУ

ГПУ имеют ограничения по допустимой динамике изменения нагрузки, что существенно осложняет их применение в энергосистемах с резко переменной нагрузкой. Поэтому основное внимание в ходе испытаний уделялось проверке эффективности и отладке алгоритмов управления СНЭ для уменьшения скорости изменения мощности ГПУ при резких бросках нагрузки.

Во время испытаний выполнена проверка алгоритма управления СНЭ, который для ограничения скорости изменения мощности ГПУ при резких изменениях нагрузки, обеспечивает плавное изменение генерируемой мощности, значительно уменьшая просадки и забросы частоты, что исключает возможность отключения ГПУ технологическими защитами.

На рисунке 6.2 показан фрагмент осциллограммы, полученной во время испытаний, иллюстрирующий высокую эффективность СНЭ при ограничении скорости изменения мощности ГПУ при набросах/сбросах нагрузки в диапазоне 600, 800 и 1200 кВт. Без использования СНЭ такие броски мощности приводят к безусловному срабатыванию технологической защиты и отключению ГПУ.

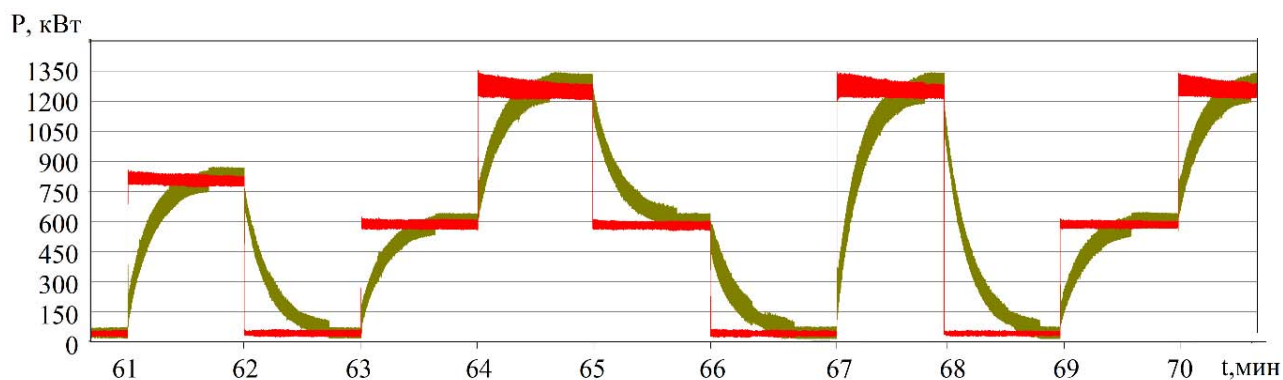


Рисунок 6.2 – Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет) и мощности ГПУ (зеленый цвет) при допустимой скорости изменения мощности (уставке) 22,5 кВт/с

На рисунке 6.3 представлены осциллограммы, полученные при проведении опыта, аналогичного вышеописанному, 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 описанном выше опыте, 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 мощности и энергии СНЭ.

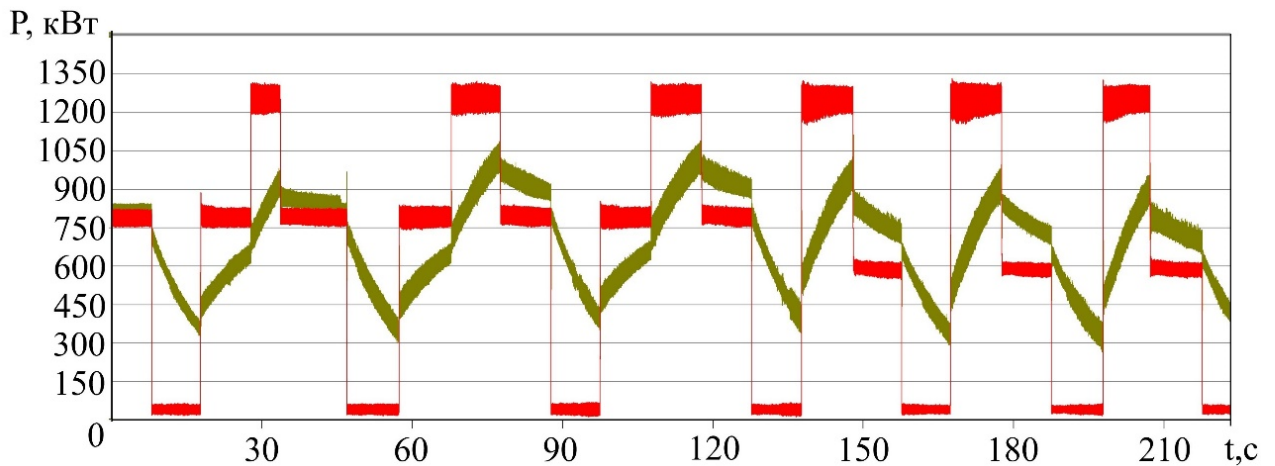


Рисунок 6.3 – Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет) и мощности ГПУ (зеленый цвет) при допустимой скорости изменения мощности (уставке) 22,5 кВт/с

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

Применение СНЭ для совместной работы с ГПУ при резко переменной нагрузке, позволяет ограничивать скорость изменения мощности генератора до допустимых значений. За счёт этого существенно снижаются требования к характеристикам и типу генераторного агрегата при резко переменной нагрузке, что особенно актуально для автономных энергосистем, в составе которых эксплуатируются ГПУ. Результаты испытаний показали высокую эффективность промышленного образца СНЭ и алгоритма управления активной мощностью для ограничения скорости изменения мощности ГПУ.

6.1.2 Натурные испытания СНЭ в составе системы электроснабжения промышленного предприятия

Испытания промышленного образца СНЭ-10-1200-400, работающего в составе системы электроснабжения промышленного предприятия, выполнены ООО «СНЭ» 19 мая 2020 года в Новосибирске.

Испытания выполнены для оценки особенностей работы СНЭ-10-1200-400 в составе системы электроснабжения промышленного предприятия, получающего

электроэнергию от ЕЭС, в условиях реальной эксплуатации. Выполнен анализ показателей качества электрической энергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013 при работающей СНЭ. Общий вид СНЭ представлен на рисунке 6.4.



Рисунок 6.4 – Внешний вид СНЭ-10-1200-400-УХЛ1 на испытательной площадке

Аналогично с испытаниями (см. параграф 6.1.1) СНЭ работала с алгоритмом ограничения скорости изменения мощности. На рисунке 6.5 приведена осциллограмма эксперимента при уставке ограничения скорости изменения мощности 20 кВт/с. Дополнительно на рисунке показан график изменения уровня заряда в темпе переходного процесса. При номинальной энергоемкости СНЭ, равной 400 кВт·ч, уровень заряда в ходе эксперимента изменялся не более 0,2%.

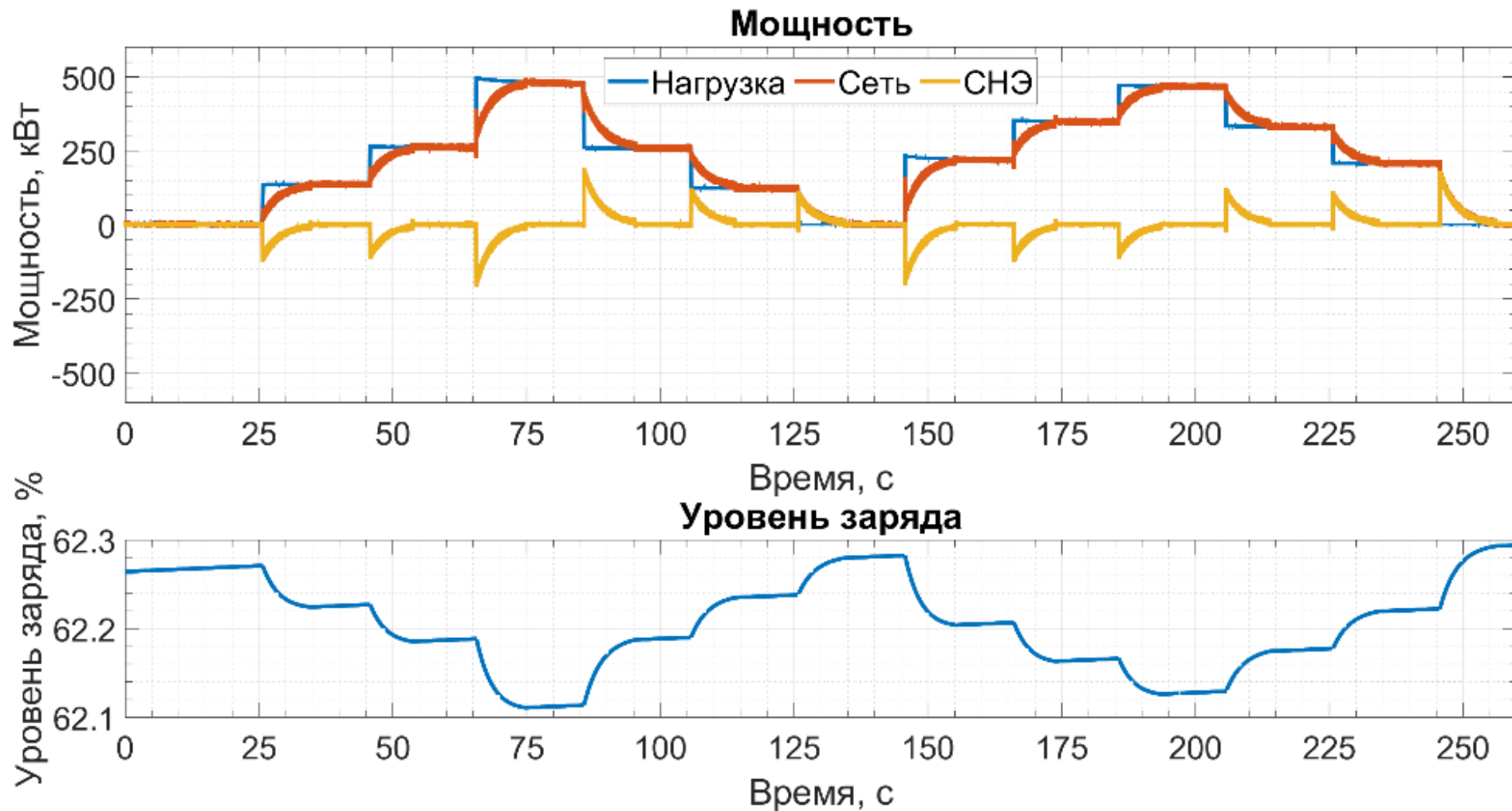


Рисунок 6.5 – Экспериментальные осциллограммы режимных параметров СНЭ при работе на резкопеременную нагрузку (сверху вниз: синий цвет - мощность нагрузки, красный цвет - мощность из сети, желтый цвет - мощность СНЭ), нижняя – уровень заряда.

В ходе испытаний все системы СНЭ отработали штатно, без сбоев, приводящих к её остановке. Алгоритм сглаживания бросков мощности в этом случае работал так же, как и в автономной системе, несмотря на помехи в системе электроснабжения, создаваемые работающим оборудованием предприятия. В ходе работы СНЭ не выявлен выход показателей качества электрической энергии за нормируемые ГОСТ 32144-2013 значения.

6.1.3 Выводы по результатам натурных испытаний

Проведенные серии испытаний показали успешную работу СНЭ как в составе автономной электростанции, так и в составе системы электроснабжения промышленного предприятия, получающего электроэнергию от ЕЭС. Во время проведения испытаний СНЭ отработала штатно, надёжно, без ошибок и поломок, при этом СНЭ выполняла все возложенные на нее функции.

По результатам испытаний можно сделать вывод о готовности российской промышленности производить новое высокотехнологичное оборудование для нужд энергетики – системы накопления энергии.

6.2 Примеры применения разработанных математических моделей и методик в практической деятельности производственного предприятия

Автором диссертационной работы были введены в практику деятельности общества с ограниченной ответственностью «Системы накопления энергии» (Далее – ООО «СНЭ») результаты диссертационного исследования:

1. Разработаны рабочая программа и учебно-методические материалы учебного курса «Принципы работы и основы применения систем накопления электрической энергии в энергетической отрасли» для обучения сотрудников ООО «СНЭ» и сторонних организаций по тематике систем накопления электрической энергии.
2. Разработана и внедрена «Методика выбора параметров системы накопления электрической энергии и подготовки технической части технико-коммерческих предложений».

3. Выполнен проект «Разработка модели СНЭ в программном комплексе DigSilent PowerFactory для анализа режимов работы в составе энергообъекта» с внедрением результатов проекта в практическую деятельность компании ООО «СНЭ».
4. Получен патент RU 2736701 С1 «Система и способ построения модели энергосистемы и проведения расчетов режимов энергосистемы и модель системы накопления электрической энергии, предназначенная для включения в систему».

Выводы по главе 6

Автором диссертационной работы были введены в практику деятельности российского производителя СНЭ (ООО «СНЭ») результаты диссертационного исследования.

Успешное внедрение результатов исследования в практику предприятия свидетельствует о высокой практической значимости результатов исследования автора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивное развитие технологий накопления и хранения энергии в промышленных масштабах в последние десятилетия и их практическое применение открыли новый этап в развитии современной электроэнергетики. Многофункциональные, быстродействующие системы накопления энергии (СНЭ) позволяют принципиально по-новому решать многие сложные задачи по ведению режимов, управлению энергосистемами в переходных режимах, по противоаварийному управлению и автоматике, повышению надёжности и живучести энергосистем, повышению качества электроэнергии.

При выполнении диссертационной работы поставлены две основные цели:

1. Разработать математическую модель системы накопления электроэнергии, совместимую с современными промышленными программными вычислительными комплексами.
2. Разработать методики выбора основных параметров СНЭ.

Объектом исследования выбрана система накопления энергии в составе энергосистемы и в автономной системе электроснабжения.

Для оценки целесообразности разработки модели СНЭ (в составе энергосистем) для расчета электромеханических переходных процессов и установившихся режимов выполнен анализ применимости современных ПВК (PowerFactory, MATLAB – Simulink, ETAP, EUROSTAG, RUSTab, PSCAD) для расчётов электромеханических переходных процессов в энергосистемах с накопителями энергии. Результаты анализа различных ПВК, показали, что они либо не имеют в своей инструментарии готовые к использованию математические модели СНЭ, либо предлагаемые ими модели не учитывают в достаточной мере характеристики основных элементов СНЭ и особенности их функционирования в составе энергосистемы.

При разработке методики расчёта параметров СНЭ предварительно выполнен анализ методик, предлагаемых зарубежными и отечественными авторами. Было показано, что:

1. Отсутствуют методики для расчета параметров для группы задач в которых СНЭ работает в условиях резкопеременной нагрузки.
2. Отсутствуют методики для расчета параметров, основывающиеся на расчётах электромеханических переходных процессов в энергосистемах со СНЭ при заданном алгоритме её работы.

С учетом выявленных недостатков существующих моделей СНЭ и с учётом особенностей расчета электромеханических переходных процессов сформулированы следующие требования к разрабатываемой математической модели СНЭ:

1. Модель должна быть пригодна для моделирования основных актуальных типов СНЭ – на базе аккумуляторных батарей, суперконденсаторов, сверхпроводниковых индуктивных накопителей, электромеханических (кинетических) накопителей.

2. Модель должна устанавливать взаимосвязь основных параметров режима (токов, напряжений, мощностей) на зажимах СНЭ без учёта её внутренней структуры (принцип «чёрного ящика»).

3. Для расчёта режимов и переходных процессов в энергосистеме модель СНЭ должна быть совместима с ПВК, используемыми в практике расчётов режимов и переходных электромеханических процессов в энергосистемах по действующим значениям переменных.

4. Модель должна учитывать изменение заряда подсистемы накопления и изменение связанных с ним характеристик СНЭ в процессе энергообмена с системой.

5. Модель должна учитывать процесс саморазряда в подсистеме накопления.

6. Модель должна учитывать потери мощности в подсистемах преобразования и распределения при заряде/разряде СНЭ.

7. В модели должна быть предусмотрена возможность создания пользователем (исследователем) системы управления СНЭ верхнего уровня,

связывающую любой набор режимных параметров энергосистемы и желаемые значения активной и реактивной мощности на зажимах СНЭ.

Разработанная математическая модель, учитывает структуру, параметры, основные характеристики СНЭ. Модель позволяет вести расчет по действующим значениям переменных, что является необходимым условием для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистемах. Модель построена по модульному принципу. Каждый элемент модели СНЭ по необходимости может быть изменен, удален или добавлен новый в зависимости от решаемых задач. Модель включает в себя основные подсистемы СНЭ, которые влияют на энергообмен в точке подключения к сети: подсистема накопления энергии, подсистема преобразования энергии, подсистема распределения энергии.

Выполнена верификация разработанной модели СНЭ. Верификации модели проводилась сопоставлением результатов натурных опытов, выполненных на экспериментальной автономной энергосистеме в составе: ДГУ мощностью 125 кВА, ступенчато коммутируемая активно-индуктивная нагрузка и СНЭ мощностью 100 кВА и энергоёмкостью 153 кВт·час, с результатами расчётов на математической модели. Математическая модель СНЭ для расчётов электромеханических переходных процессов показала достаточное хорошее качественное и количественное совпадение результатов эксперимента и расчётов по основным характерным режимным параметрам.

Показана универсальность модели при расчете переходных процессов с разными типами накопителей. Примеры расчетов приведены для СНЭ с использованием в качестве аккумулирующего элемента ЛИА, суперконденсаторов, маховика. Модель также позволяет исследовать любые другие типы накопителей при известной (или рассчитанной) зависимости располагаемой мощности от уровня заряда, свойственной рассматриваемому типу аккумулирующего элемента.

Получен патент РФ RU 2736701 C1 «Система и способ построения модели энергосистемы и проведения расчетов режимов энергосистемы и модель системы накопления электрической энергии, предназначенная для включения в систему».

Предложены две методики расчёта параметров СНЭ:

1. Методика выбора основных параметров СНЭ на основе анализа амплитудно-частотных характеристик графиков нагрузки для задач демпфирования колебаний мощности нагрузки заданной частоты.

2. Методика выбора основных параметров СНЭ на основе анализа результатов расчета переходного процесса с заданным алгоритмом управления.

Автор принимал непосредственное участие в проведении испытаний промышленного образца СНЭ-10-1200-400 мощностью 1200 кВА и энергоёмкостью 400 кВт·час, в том числе в части разработки программ и методик испытаний. При проведении испытаний были использованы разработки автора по моделированию СНЭ и методик расчета её параметров.

Испытания проведены в 2019 г. и в 2020 в г. Новосибирске совместно с сотрудниками ООО «СНЭ», ООО «СПТ», Институтом силовой электроники НГТУ.

Продолжение и дальнейшее развитие работы связано с решением ряда актуальных задач по оптимизации структуры, состава оборудования и режимов работы электростанций автономной и распределённой генерации, в том числе с возобновляемыми источниками энергии. Применение для решения этих задач СНЭ с оптимально выбранными параметрами и эффективными алгоритмами управления может дать значительный технико-экономический эффект за счёт рационального использования местных источников энергии (прежде всего природного и попутного газа, а также ВИЭ). В основном это относится к предприятиям, связанным с добычей, транспортировкой и переработкой полезных ископаемых, располагающихся в удалённых районах Сибири и Дальнего Востока, для которых недоступно электроснабжение от ЕЭС РФ (или которые имеют с ней слабые связи). Ещё одна актуальная задача - выбор параметров и разработка алгоритмов управления СНЭ для повышения качества электроэнергии и надёжности электроснабжения в узлах с резкопеременной нагрузкой, что особенно важно для промышленных предприятий с электроустановками значительной мощности, имеющих циклическую или стохастическую нагрузку, получающих питание по тупиковым линиям электропередачи.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

AC	– alternating current (переменный ток)
BMS	– battery management system (система управления батареями)
DC	– direct current (постоянный ток)
IGBT	– insulated-gate bipolar transistor (биполярный транзистор с изолированным затвором)
SCADA	– supervisory control and data acquisition (диспетчерское управление и сбор данных)
АББМ	– аккумуляторная батарея большой мощности
АВР	– автоматический ввод резерва
АКБ	– аккумуляторная батарея
АСУ	– автоматизированная система управления
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
БПФ	– быстрое преобразование Фурье
ВАЭС	– воздушно-аккумулирующая электростанция
ВИЭ	– возобновляемые источники энергии
ГА	– генераторный агрегат
ГАЭС	– гидроаккумулирующая электростанция
ГПУ	– газопоршневая установка
ГЭС	– гидроэлектростанция
ДГУ	– дизель-генераторная установка
ЕЭС	– единая энергетическая система
КИУМ	– коэффициент использования установленной мощности
КПД	– коэффициент полезного действия
ЛИА	– литий-ионный аккумулятор
МЭИ	– Московский энергетический институт
НГТУ	– Новосибирский государственный технический университет
НЧК	– низкочастотные колебания
НЭ	– накопитель энергии

ПА	–	противоаварийная автоматика
ПВК	–	программно-вычислительный комплекс
ПН	–	подсистема накопления
ПС	–	электрическая подстанция
РЗаА	–	релейная защита и автоматика
СибНИИЭ	–	Сибирский научно-исследовательский институт энергетики
СК	–	суперконденсатор
СНЭ	–	система накопления энергии
СПИН	–	сверхпроводниковый индуктивный накопитель
СУ	–	система управления
СЭС	–	солнечная электростанция
ТММ	–	теория мгновенной мощности
ТЭС	–	тепловая электростанция
ЭДС	–	электродвижущая сила
ЭМН	–	электрохимический накопитель
ДПФ	–	дискретное преобразование Фурье

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Российской Федерации, 2017. URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/9013/74739> (дата обращения: 15.04.2019).
2. The Strategic Energy Technology Plan [Электронный ресурс] // European Commission, 2017. URL: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/technology-and-innovation/strategic-energy-technology-plan> (дата обращения: 15.04.2019).
3. Global energy storage database. [Электронный ресурс] URL: <http://www.energystorageexchange.org/projects>. (дата обращения: 07.05.2017).
4. Удальцов Ю., Холкин Д. Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития/ экспертно-аналитический доклад/ Москва, 2018, 70 С.
5. Куликов Ю.А. Накопители электроэнергии - эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем / Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы 9 междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Казань, 1–5 окт. 2018 г. В 3 т. – Казань: Казан. гос. энергет. ун-т, 2018. – Т. 1. – С. 38–43.
6. Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры. Инфраструктурный центр EnergyNet. Экспертно-аналитический отчет. Ред: Д.В. Холкин, Д.А. Корев, Москва 2019, 158 С.
7. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергообъединений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 319 С.
8. 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, № 4. стр. 32–39.
9. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы + Testing of industrial design energy storage system (ESS-101200-400) and gas piston units in experimental power system / П. А. Бачурин, Д. С. Гладков, В. М. Зырянов, Г.А. Пранкевич, С. В. Кучак, Г. Б. Нестеренко, Д. Е. Лебедев, А. Н.

Решетников [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2020. - № 2 (59). - С. 18-24.

10. Гибридный накопитель энергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Р.Н. Бердников, В.Е. Фортов, Ю.Г. Шакарян, К.К. Деньщиков // Энергия единой сети, 2013. №1. С. 40-51.

11. Zobaа, A.F. Energy storage technologies and applications. Rijeka, Croatia: Intech, 2013., - 328 pp.

12. Эффекты применения накопителей энергии в изолированных энергосистемах России / В.Ю. Кононенко, О.В. Вещунов, В.П. Билашенко, Д.О. Смоленцев // Арктика: экология и экономика. – 2014. - №2 (14). – С.61-66.

13. 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, 10, 2018, С.2 – 10.

14. Накопительная сила энергии. Тематическое приложение к газете «Коммерсантъ». Среда 18 сентября 2019 №169, С.13.

15. Энергетические характеристики гибридной системы накопления электрической энергии / В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, Г. Б. Нестеренко, Г. А. Пранкевич, А. М. Потапенко // Энергия единой сети. - 2018. – №6 (42). – С. 34–43.

16. ИБП и сетевые накопители: МО - 150V53F - 0 [Электронный ресурс] // Компания “ТЭЭМП”. URL: <http://teemp.ru/products/ehnergetika/setevyue-nakoriteli/mo-150v53f-0/> (дата обращения: 01.11.2018).

17. Specification of LiFePO4 Prismatic Module: 3.2V 100Ah, 3C Rate (320Wh). – USA: AA Portable Power Corp, 2010. – 4 p.

18. A. Stepanov, I. Galkin, Development of supercapacitor based uninterruptible power supply, Doctoral school of energy- and geo-technology, January 15–20, 2007. Kuressaare, Estonia, pp. 136-141.

19. А. Ворошилов, А. Петров, Е. Чудинов. Литий-железо-фосфатная аккумуляторная батарея. Моделирование режима зарядки // Новости ЭлектроТехники, 2017. № 2(104)–3(105). С. 44-49.

20. Преобразователь напряжения двунаправленный производства ООО «СПТ»: каталог. – Новосибирск: ООО «Системы Постоянного Тока», 2018. – 2 с.
21. ГОСТ Р 58092.1-2018 Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Термины и определения . – Введ. 2019-03-01.
22. Robert A. Huggins / Energy Storage. Springer, 2010, p. 435
23. Чудинов, Е.А. Применение литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей в составе СОПТ на распределительных подстанциях и электростанциях / Е. А. Чудинов, А. Н. Ворошилов, С.В. Кучак // Энергоэксперт: информационно-аналитический журнал – Москва: Издательский дом «Вся электротехника», 2016 – № 2 – С. 46 – 54
24. Мунасыпов, Р.А., Таназлы, Г.И., Таназлы, А.И. Подбор параметров и режимов работы зарядных устройств емкостный накопителей, Журнал "Вестник УГАТУ. Энергетика, Электрификация, Электрическое машиностроение", Т.16, №8(53), 2012. – С.155-164. УДК 621.319.4:681.5
25. Frank S. Barnes / Large Energy Storage Systems. Handbook. CRC Press, 2011, p. 254
26. Chien, Hsing-Chi; Cheng, Wei-Yun; Wang, Yong-Hui; Lu, Shih-Yuan (2012-12-05). "Ultrahigh Specific Capacitances for Supercapacitors Achieved by Nickel Cobaltite/Carbon Aerogel Composites". *Advanced Functional Materials*. 22 (23): 5038–5043. doi:10.1002/adfm.201201176. ISSN 1616-3028. Volume 22, Issue 23 p. 5038-5043
27. Crompton, T.R. (20 March 2000). *Battery Reference Book* (third ed.). Newnes. p. Glossary 3. ISBN 978-0-08-049995-6. Retrieved 18 March 2016, p. 800.
28. Load leveling for a diesel generator using an energy storage and instantaneous power theory / М. А. Dybko, S. V. Kuchak, P. A. Bachurin, S. V. Brovanov, S. A. Kharitonov // The 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018 : proc., Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018. – IEEE Computer Society, 2018. – P. 567-573. - ISBN 978-153865021-9. - DOI: 10.1109/EDM.2018.8434936.

29. NESSCAP 2.7V/ 1200F Cell Datasheet. 2014 Nesscap Co., Ltd. All Rights Reserved, 2 p.

30. Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) Battery Protocol 12.8V, 32AH – Datasheet. BatterySpace. AA Portable Power Corp / dba BatterySpace.com, 4 p.

31. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов вузов. — Изд. 2-е перераб. и доп. — Л.: Энергия, 1974. - 840 с.

32. Эффективность применения накопителей энергии в автономных энергосистемах с резкопеременной нагрузкой / В.А. Алемасов, Д.И. Баранов, М.Д. Бимуханов, В.М. Зырянов, А.Б. Мосиенко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2007. №2. С. 113-120.

33. Маховичные накопители кинетической энергии НКЭ-3Г для подъёмно-транспортного оборудования. Буклет ООО «КИНЕМАК» [Электронный ресурс], URL: <http://www.kinemak.ru/wp-content/uploads/2014/07/List2s.pdf> (дата обращения 02.04.2020).

34. Экспериментальные исследования и испытания совместной работы системы накопления энергии и ДГУ в составе автономной энергосистемы / В. М. Зырянов, С. В. Кучак, П. А. Бачурин, С. А. Харитонов // Промышленная энергетика. - 2018. - № 10 - С. 2-10.

35. IEEE Std 421.5-2016, Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies (Redline Revision of IEEE Std 421.5-2005). – USA: IEEE Power and Energy Society, 2016, p. 453.

36. G. Sybille, T. Zavaïou, Emergency Diesel-Generator and Asynchronous Motor [Электронный ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/emergency-diesel-generator-and-asynchronous-motor.html>. (дата обращения: 18.01.2018).

37. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. М.: 2003. 496 с.

38. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия. Ленинградское отд-ние, 1980. 256 с.

39. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.
40. Балугев Д.Ю., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Пранкевич Г.А. Методика расчета основных параметров накопителя энергии по экспериментальным нагрузочным диаграммам // Вестник ИрГТУ. – 2018. – №5 (22). – С. 105 – 114.
41. 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.
42. Лайонс, Р.Р. Цифровая обработка сигналов [Текст]: уч. пособие/ Лайонс, Р.Р. - М: Бином-Пресс, 2006. — 656 с.
43. Снеддон И. Преобразование Фурье [Текст]:учебник/ Снеддон И.- М:,1955 г - 268 с.
44. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления [Текст] : учебник /перевод с английского Ю. Ф. Касимова и И. П. Пчелинцева под редакцией чл.-кор. АН КазССР В. М. Амербаева и Т. Э. Кренкеля.- М.: Радио и связь , 1985 - 640 с.
45. Зырянов В.М. Основные характеристики сверхпроводящего индуктивного накопителя как элемента энергосистемы и оценка возможности его применения для аварийного управления. дис. канд. тех. наук: 05.14.02, 1985 г.
46. Задачи оптимизации структуры и алгоритмов управления автономными энергосистемами / В. М. Зырянов, А.И. Елшин, А.А. Борисов // Сибирский научный вестник. Новосибирский научный центр \"Ноосферные знания и технологии\", РАЕН, выпуск XIII. Новосибирск: Изд. НГАВТ, -2010, с. 16-22.
47. Оценка экономической эффективности применения емкостного и электромеханического накопителя в энергосистеме плавкрана / В. М. Зырянов, А.А. Борисов, И.Г. Фюттик // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока». Новосибирск, Изд. НГАВТ, -2012. – Вып.1. - С. 92-96.
48. N.Shi. Energy Storage System Sizing Based on a Reliability Assessment of Power Systems Integrated with Wind Power [Electronic resource]/ Shi N., Luo Y. Mode of access:

https://www.researchgate.net/publication/272647096_An_Energy_Storage_System_Sizing_Method_for_Wind_Power_Integration. – Title from screen. 20 p.

49. Dulout J. Optimal sizing of a lithium battery energy storage system for grid-connected photovoltaic systems/ J.Dulout, Amjad Anvari-Moghaddam, Adriana Luna, Bruno Jammes, Corinne Alonso// International Conference on DC Microgrids (ICDCM) 2017, IEEE PES ; IEEE PELS, Jun 2017,pp. 582-587, Nuremberg, Germany.

50. Sioshansi R.; Madaeni, S.H.; Denholm, P. A dynamic programming approach to estimate the capacity value of energy storage/ R. Sioshansi; S.H.Madaeni; P. Denholm. IEEE Trans. Power Syst. 2014, 29, 395–403.

51. Fossati J.P. A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids [Electronic resource]/J.P.Fossati, A.Galarza, L.Fontan. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/272378414_A_method_for_optimal_sizing_energy_storage_systems_for_microgrids. – Title from screen, pp 48 – 58.

52. Сокольникова Т. В. Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах с активными потребителями / Т. В. Сокольникова, К. В. Суслов, Ломбарди Пио // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 10. – С. 206–211.

53. Степаненко В. П. Определение параметров накопителей энергии комбинированных силовых установок / В. П. Степаненко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — №8. — С. 166-173.

54. Муровский С.П. Расчет параметров накопителей энергии для солнечных электростанций при включении их в объединенную энергосеть/ С.П.Муровский, Л.Д.Сокут, В.П.Лесик. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-parametrov-nakopiteley-energii-dlya-solnechnyh-elektrostantsiy-pri-vklyuchenii-ih-v-obedinennuyu-energiset>. С. 93 – 95.

55. Латочкин И.В. Выбор параметров накопителя энергии и оптимизация системы электроснабжения предприятия/И.В.Латочкин, Н.И.Смоленцев// Ползуновский вестник. – 2016. - №4-2. –С. 65-69.

56. Алемасов В.А., Борисов А.А., Зырянов В.М. Оценка перспектив снижения расхода топлива в судовой энергосистеме с накопителем энергии // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011. №2. С. 215-217.

57. 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. №2 (14). С. 61-66.

58. Балуев Д.Ю., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Пранкевич Г.А. Применение накопителя энергии для демпфирования колебаний мощности в автономных энергосистемах // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития: сборник материалов XVIII Всероссийской научно-практической конференции (г. Новосибирск, 12 мая-6 июня 2017 г.). Новосибирск : Изд-во ЦРНС, 2017. С. 181-187.

59. Kiryanova N.G., Baluev D.Y., Prankevich G.A., Zyryanov V.M. Energy storage device application for load oscillations damping in isolated power systems // Advances in Engineering Research (Actual issues of mechanical engineering (AIME 2017) : proceedings of the international conference, Tomsk, 27–29 July 2017). 2017. vol. 133, pp. 325-330. DOI: doi:10.2991/aime-17.2017.53.

60. Климова, Т.Г. Анализ влияния периодически меняющейся нагрузки на возникновение низкочастотных колебаний [Текст] / Т.Г. Климова, М.В. Савватин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем. - Сочи, 2015. – С. 1-8.

61. Литкенс И.В., Пуго В.И. Колебательные свойства электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.

62. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы / П.А. Бачурин, Д.С. Гладков, В.М. Зырянов, С.В. Кучак, Д.Е. Лебедев, Г.Б. Нестеренко, и др. // Журнал "Электроэнергия. Передача и распределение", 2020 г. С. 18 – 24.

ПРИЛОЖЕНИЕ «А» ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2736701

Система и способ построения модели энергосистемы и проведения расчетов режимов энергосистемы и модель системы накопления электрической энергии, предназначенная для включения в систему

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью «Системы накопления энергии» (RU)*

Авторы: *Нестеренко Глеб Борисович (RU), Зырянов Вячеслав Михайлович (RU), Пранкевич Глеб Александрович (RU), Удовиченко Алексей Вячеславович (RU), Гужавина Варвара Владимировна (RU)*

Заявка № 2020113079

Приоритет изобретения 08 апреля 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 19 ноября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 08 апреля 2040 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



Россия, г.Новосибирск,
ул. Серебренниковская, 14/1
8 (800) 707-66-50
Info@estorsys.ru
ОГРН 1165476217114 ИНН 5405992553

24.12.2020

Для представления в
диссертационный совет

АКТ О ВНЕДРЕНИИ Результатов диссертационного исследования

Результаты диссертационной работы Пранкевича Глеба Александровича «Разработка математической модели и методики выбора параметров накопителя энергии как элемента энергосистемы» внедрены в практику деятельности общества с ограниченной ответственностью «Системы накопления энергии» (Далее – ООО «СНЭ»). В частности:

1. Разработаны рабочая программа и учебно-методические материалы учебного курса «Принципы работы и основы применения систем накопления электрической энергии в энергетической отрасли» для проведения обучения сотрудников ООО «СНЭ» и сторонних организаций по тематике систем накопления электрической энергии;
2. Разработана и внедрена «СТП.И.04.02-2017 Методика выбора параметров системы накопления электрической энергии и подготовки технической части технико-коммерческих предложений»;
3. Реализован проект «Разработка модели СНЭ в программном комплексе для анализа режимов работы в составе энергообъекта» с последующим внедрением результатов проекта в деятельность компании ООО «СНЭ»;
4. Получен патент RU 2736701 C1 «Система и способ построения модели энергосистемы и проведения расчетов режимов энергосистемы и модель системы накопления электрической энергии, предназначенная для включения в систему»;

И.о. Генерального директора ООО «СНЭ»



Д.Г. Метальников

УТВЕРЖДАЮ:



Проректор по научной работе

д.т.н.

Брованов С.В.

2021 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета результатов диссертационной работы

Пранкевича Глеба Александровича

«Разработка математической модели и методики выбора параметров системы накопления электроэнергии как элемента энергосистемы»

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационного исследования Пранкевича Глеба Александровича «Разработка математической модели и методики выбора параметров системы накопления электроэнергии как элемента энергосистемы» в учебный процесс кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Новосибирского государственного технического университета.

Предмет внедрения:

1. Технология обработки результатов мониторинга режимных параметров энергообъектов с привлечением теории мгновенной мощности и частотного анализа графиков нагрузки;
2. Методика выбора основных параметров СНЭ на основе анализа амплитудно-частотных характеристик графиков нагрузки, полученных в результате мониторинга объекта, с применением быстрого преобразования Фурье.

Характер внедрения:

1. Использование студентами и аспирантами при выполнении исследовательских и выпускных квалификационных работ.

Декан факультета энергетики, к.т.н. А.В. Белоглазов А.В. Белоглазов