

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Национальный исследовательский Томский политехнический
университет»**

На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ Алексей Сергеевич

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ВСЕРЕЖИМНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ СТАТИЧЕСКИХ
СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ**

Специальность 05.14.02 – «Электрические станции и
электроэнергетические системы»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент, Ю.С. Боровиков

Томск – 2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Анализ задачи и средств моделирования функционирования статических синхронных компенсаторов в электроэнергетических системах.....	11
1.1 Схемы, характеристики и системы управления статических синхронных компенсаторов и их функционирование в электрических сетях.....	13
1.2 Средства моделирования функционирования статических синхронных компенсаторов в электроэнергетических системах.....	25
1.3 Выбор и обоснование направления решения проблемы моделирования статических синхронных компенсаторов в ЭЭС	30
2 Гибридный процессор СТАТКОМ.....	35
2.1 Синтез всережимной модели оборудования СТАТКОМ.....	35
2.2 Система автоматического управления СТАТКОМ	48
2.3 Выводы	51
3 Реализация и компьютерное моделирование гибридного процессора для всережимного моделирования в реальном времени СТАТКОМ.....	52
3.1 Реализация кривой намагничивания трансформатора в гибридном процессоре СТАТКОМ.....	53
3.2 Компьютерное моделирование и исследование основных фрагментов сопроцессоров гибридного процессора СТАТКОМ.....	56
3.2.1 Компьютерная модель гибридного сопроцессора трансформатора	58
3.2.2 Компьютерная модель гибридного сопроцессора реактора.....	63
3.2.3 Компьютерная модель статического преобразователя и гибридного сопроцессора реактора.....	67
3.2.4 Компьютерная модель гибридного сопроцессора цепи выпрямленного напряжения	71

3.2.5 Компьютерная модель гибридного сопроцессора фильтра.....	73
3.3 Блок микропроцессоров гибридного процессора СТАТКОМ	83
3.4 Разработка специализированного программного обеспечения средств моделирования СТАТКОМ.....	85
3.4 Выводы.....	93
4 Экспериментальные исследования средств всережимного моделирования СТАТКОМ	95
4.1 Экспериментальные исследования программно-технических средств моделирования СТАТКОМ в автономном режиме работы.....	96
4.2 Экспериментальные исследования программно-технических средств моделирования СТАТКОМ в составе модели ЭЭС.....	108
4.2.1 Экспериментальные исследования в режиме поддержания напряжения при непрерывном изменении нагрузки.....	113
4.2.2 Экспериментальные исследования в режиме поддержания напряжения при набросе и сбросе нагрузки	119
4.2.3 Экспериментальные исследования в режиме короткого замыкания на нагрузке	123
4.3 Выводы.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
Список использованных источников	137

ВВЕДЕНИЕ

К электроэнергетическим системам (ЭЭС) предъявляются все более жесткие требования по обеспечению надежности электроснабжения потребителей, качеству электроэнергии, уровню потерь и другим характеристикам. Подобные требования в сложных, протяженных и разветвленных ЭЭС, при непрерывном их функционировании в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы, могут быть выполнены только с путем комплексной автоматизации процессов на всех энергетических и информационных уровнях.

В настоящее время наименее автоматизированными и наименее управляемыми остаются электрические сети. Планируемым и уже отчасти реализуемым решением данной проблемы является создание управляемых (гибких) линий электропередач переменного тока путем дополнения существующих ЭЭС современными устройствами FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System). Устройства FACTS на базе силовой полупроводниковой электроники и цифровой микропроцессорной техники, позволяют осуществлять локальное или системное автоматическое управление процессами и режимами в ЭЭС. Одним из основных устройств FACTS является статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ).

Собственно СТАТКОМ является электрической установкой, состоящей из сглаживающего реактора, статического преобразователя и накопителя энергии на стороне постоянного тока (напряжения) и предназначен, с помощью управляемой компенсации реактивной мощности, мощности искажений, выполнять быстродействующее непрерывное регулирование напряжения сети. Устройство СТАТКОМ позволяет компенсировать реактивную мощность, увеличивать пропускную способность линий электропередач, осуществлять стабилизацию, симметрирование и активную фильтрацию напряжения за счет поочередного междуфазного взаимодействия через накопитель энергии.

Применение СТАТКОМ позволяет осуществлять динамическое регулирование напряжения в переходных режимах: при коммутациях и резком изменении нагрузки, в аварийных и послеаварийных режимах. В магистральных и системообразующих сетях СТАТКОМ может использоваться для повышения устойчивости и оптимизации переходных процессов.

При проектировании, исследовании и эксплуатации ЭЭС, содержащих FACTS, необходимо решать сложные и нетривиальные задачи:

- определения и обоснования выбора состава, мощности и мест установки устройств FACTS;
- разработка и исследование законов и алгоритмов локального и системного управления в ЭЭС, с целью обеспечения выполнения требований надежного и эффективного электроснабжения потребителей;
- анализа условий работы и функционирования силового оборудования, и действия в этих условиях релейной защиты (РЗ), технологической и противоаварийной автоматики (ПА) и ряда других задач.

Непрерывное и быстродействующее функционирование СТАТКОМ и других устройств FACTS, в том числе в аварийных режимах, значительно усложняет протекающие с ЭЭС процессы. Поэтому при проектировании, исследовании и эксплуатации СТАТКОМ в ЭЭС необходимо их адекватное моделирование.

Для моделирования процессов в ЭЭС в основном применяются программные вычислительные комплексы для персональных компьютеров и специализированные многопроцессорные цифровые вычислительные системы. Недостатком цифровых систем является неременное наличие компромисса между размерностью динамической модели, шагом интегрирования и временем расчета. Этот компромисс обусловлен применяемыми при цифровом моделировании численными методами решения дифференциальных уравнений, обладающими методической ошибкой, которая может накапливаться с каждым шагом расчета, достигая

при большом количестве шагов неприемлемых значений. В результате при моделировании процессов в реальной энергосистеме неизбежно применяется декомпозиция процессов, моделирование по однолинейным схемам, что неприемлемо при моделировании ЭЭС, содержащих устройства FACTS междуфазного принципа действия, и при наличии значительного уровня гармоник в токах и напряжениях, влияющих на работу устройств автоматики и защиты.

Таким образом, существующие средства моделирования не позволяют решать весь спектр задач, связанных с проектированием, исследованием и эксплуатацией ЭЭС, содержащих устройства FACTS. Кроме того тестирование устройств автоматики, необходимое при вводе в эксплуатацию установки, возможно только в замкнутом цикле с моделью объекта управления в реальном времени. Наиболее полное и достоверное решение данных задач обеспечивают гибридные средства моделирования, сочетающие в себе достоинства программного, аналогового и физического моделирования.

В связи с вышеизложенным **целью данной работы** является разработка и исследование программно-технических средств непрерывного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном его интервале процессов в статическом синхронном компенсаторе при его функционировании в составе энергосистемы в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах.

Для достижения поставленной поставлены и решены следующие задачи:

- Анализ структуры, режимов и процессов в силовом оборудовании и информационно-управляющей системе;
- Обоснование направления решения проблемы всережимного бездекомпозиционного моделирования в реальном времени СТАТКОМ;

- Разработка структуры и принципов построения программно-технических средств всережимного непрерывного моделирования в реальном времени функционирования СТАТКОМ в составе ЭЭС;

- Синтез математического описания процессов в трехфазном силовом оборудовании и системе автоматического управления СТАТКОМ, позволяющего осуществлять его всережимное бездекомпозиционное моделирование при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных процессах в оборудовании СТАТКОМ;

- Разработка гибридного процессора СТАТКОМ (ГПС), обеспечивающего непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной требуемой инструментальной погрешностью всережимной математической модели, описывающих процессы в СТАТКОМ, с учетом различных его типов;

- Выполнение компьютерного моделирования работы схем всех основных функциональных блоков ГПС, с учетом аппаратной реализации, для определения их технических характеристик и требований к схеме и применяемой элементной базе;

- Разработка экспериментального образца ГПС;

- Разработка специализированного программного обеспечения, включающего комплекс программ, обеспечивающего в реальном времени управление параметрами и структурами модели, наблюдение результатов моделирования и их преобразование с целью последующего анализа;

- Проведение экспериментальных исследований разработанных программно-технических средств моделирования СТАТКОМ в автономных режимах и в составе модели энергосистемы, подтверждающие достижение поставленной цели.

Основные методы научных исследований.

При решении поставленных в диссертации задач применялись: элементы дифференциального и интегрального исчисления, линейной алгебры, теории линейных и нелинейных электрических цепей, теории

автоматического регулирования и управления, методы математического моделирования, теории точности и чувствительности вычислительных устройств схемотехники на интегральных микросхемах.

Научная новизна.

1. Предложен способ моделирования СТАТКОМ, адаптированный для использования в средствах всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС;

2. Синтезирована бездекомпозиционная универсальная математическая модель СТАТКОМ, адаптированная к реализации программно-техническими средствами моделирования, достаточно полно и достоверно описывающая реальный непрерывный спектр процессов в оборудовании и САУ СТАТКОМ, при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах его работы;

3. Разработана структурная схема ГПС, обеспечивающая возможность непрерывного, всережимного моделирования процессов в СТАТКОМ в соответствии с синтезированной математической моделью в составе средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС;

4. Разработан ГПС, обеспечивающий непрерывное решение с гарантированной точностью в реальном времени и на неограниченном интервале синтезированных бездекомпозиционных математических моделей СТАТКОМ, трансформатора, реактора, фильтра, цепи выпрямленного напряжения, а также высокоадекватно воспроизводящий на модельном физическом уровне статический преобразователь различных топологий и всевозможные трехфазные продольные и поперечные коммутации;

5. Созданы компьютерные модели, позволяющие осуществлять исследование характеристик и процессов в ГПС, при различных параметрах, схемах и режимах работы СТАТКОМ с учетом аппаратной реализации ГПС;

6. Разработано специализированное программное обеспечение (СПО) ГПС, сервера и автоматизированных рабочих мест клиентов (пользователей), позволяющее осуществлять наиболее возможное полное управление

параметрами и структурами моделируемого оборудования и САУ для решения задач проектирования, исследования и эксплуатации оборудования, ЭЭС и алгоритмов информационно-управляющих систем на всех уровнях, а также преобразования, в том числе функциональные, форм представления информации.

Личное участие автора. Основные результаты работы, связанные с разработкой и исследованием моделей и средств их реализации, а также разработкой алгоритмов и программ периферийных процессоров, включая систему автоматического управления, и интерфейса оператора на уровне Клиентов получено лично автором.

Достоверность полученных результатов подтверждается: использованием классических положений теоретической электротехники и математики, приведенными результатами компьютерного моделирования ГПС, сравнение результатов с экспериментальными данными, корректностью выполнения теоретических построений.

Практическая ценность.

Разработанные программно-технические средства моделирования СТАТКОМ позволяют:

- выполнять непрерывное в реальном времени и на неограниченном интервале методически точное решение с гарантированной и приемлемой для всех задач инструментальной погрешностью, нелинейной системы дифференциальных уравнений описывающих процессы в СТАТКОМ с учетом действия его САУ автономно или в составе модели ЭЭС;
- разрабатывать и тестировать алгоритмы САУ СТАТКОМ и алгоритмы информационно-управляющих систем верхнего уровня автоматизации процессов и режимов, исследовать влияние СТАТКОМ на действие релейной защиты и автоматики ЭЭС;
- обеспечивать сопряжение с внешними устройствами для исследования их совместного функционирования, в том числе для задач

тестирования в замкнутом цикле станций управления СТАТКОМ, релейной защиты и автоматики энергосистем;

- осуществлять построение и разработку на базе ГПС программно-технических средств моделирования устройств FACTS, в том числе статических тиристорных компенсаторов, вставок и передач постоянного тока, объединенных регуляторов потоков мощности, для осуществления их всережимного бездекомпозиционного моделирования в реальном времени во всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы в составе ЭЭС.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (г. Томск, 2011 г.); международной научно-практической конференции и выставке «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России». Релавэкспо-2012 (г. Чебоксары, 2012 г.); всероссийской молодежной конференции «Химическая физика и актуальные проблемы энергетики» (г. Томск, 2012 г.); международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, 2012 г.); научно-практической конференции «Актуальные вопросы противоаварийного управления ОЭС Сибири» (г. Кемерово, 2012); Рабочих заседаниях кафедры ЭЭС 2011–2013 гг.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ. Получено положительное решение о выдаче патента на изобретение.

1 АНАЛИЗ ЗАДАЧИ И СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В процессе развития электроэнергетических систем в России и в мире необходимо решать множество взаимосвязанных задач, таких как увеличение пропускной способности линий электропередачи, снижение потерь, повышение качества электроэнергии и надежности электроснабжения потребителей, повышение уровня автоматизации, управляемости и наблюдаемости энергосистем и многие другие задачи [1, 2].

Перечисленные задачи решаются путем создания управляемых (гибких) линий электропередач переменного тока, получивших в зарубежной и отечественной литературе обозначение FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission System*) [2–11]. Для создания такой системы существующие электроэнергетической сети должны быть дополнены устройствами FACTS на базе силовой полупроводниковой (ПП) электроники и микропроцессорной техники, которые позволяют осуществлять непрерывное управление процессами в ЭЭС с требуемым быстродействием.

Одним из основных устройств FACTS является СТАТКОМ, в основе которого лежит статический преобразователь (СП), работающий в режиме преобразователя тока или напряжения со звеном постоянного тока или напряжения соответственно. Благодаря этому СТАТКОМ технически позволяет решать следующие задачи [5-12]:

1. Регулирование напряжения в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах;
2. Повышение пропускной способности линий электропередачи;
3. Перераспределение потоков мощности в основных электрических сетях в зависимости от спроса и его покрытия по узлам;
4. Снижения потерь электроэнергии в сетях;

5. Активная фильтрация высших гармоник;
6. Демпфирование колебаний мощности в сетях высокого и сверхвысокого напряжения.

Обычно СТАТКОМ подключается к сети высокого напряжения через сглаживающий реактор и согласующий трансформатор, между которыми, как правило, устанавливается фильтр для подавления генерируемых СП высших гармоник [5-12]. Неотъемлемым элементом СТАТКОМ является его станция управления, в которой на основе данных первичных измерительных преобразователей выполняется расчет алгоритмов системы автоматического управления (САУ) и модуляция напряжения или тока СП. Главным преимуществом СТАТКОМ является высокое быстродействие, обеспечиваемое применением СП на полностью управляемых ПП вентилях (ППВ), высокой частотой коммутации и соответствующими алгоритмами САУ.

Введение в эксплуатацию установок СТАТКОМ и других устройств FACTS значительно усложняют протекающие в ЭЭС электромагнитные и информационные процессы. При проектировании, исследовании и эксплуатации ЭЭС применяется их моделирование. Для моделирования применяются программные вычислительные комплексы (ПВК) для персональных компьютеров и специализированные цифровые вычислительные системы. Недостатком цифровых систем является непереносимое наличие компромисса между размерностью модели, шагом интегрирования и временем расчета, так как применяемые при цифровом моделировании численные методы решения дифференциальных уравнений обладают ошибкой, которая может накапливаться с каждым шагом расчета и приводить к неадекватному результату моделирования. В результате при моделировании процессов в реальной энергосистеме неизбежно применяется декомпозиция процессов, моделирование по однолинейным схемам, что неприемлемо при моделировании ЭЭС, содержащих устройства FACTS междуфазного принципа действия и наличия значительного уровня гармоник

в токах и напряжениях [13, 14].

Эти же обстоятельства значительно осложняют проблему достаточно полного и достоверного моделирования процессов в оборудовании и ЭЭС при всевозможных нормальных аварийных и послеаварийных режимах их работы. При этом полное и достоверное моделирование необходимо для надежного решения сложных и нестандартных задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с устройствами FACTS, и в последующем создаваемых на их основе активно-адаптивных электрических сетей и интеллектуальных энергосистем. Для решения этих задач применяемые модели должны отражать все принципиально значимые свойства и характеристики объекта моделирования в широком частотном диапазоне при всевозможных режимах их работы.

Требований к средствам моделирования СТАТКОМ вытекают из анализа применяемых схмотехнических решений, статических и динамических характеристик и алгоритмов САУ, влияющих на функционирование данного объекта моделирования и ЭЭС в целом.

1.1 Схемы, характеристики и системы управления статических синхронных компенсаторов и их функционирование в электрических сетях

Статический синхронный компенсатор, как и другие устройства FACTS, отличается от традиционных СКРМ наличием силовых ППВ и собственной САУ, осуществляющей их управление [6-12].

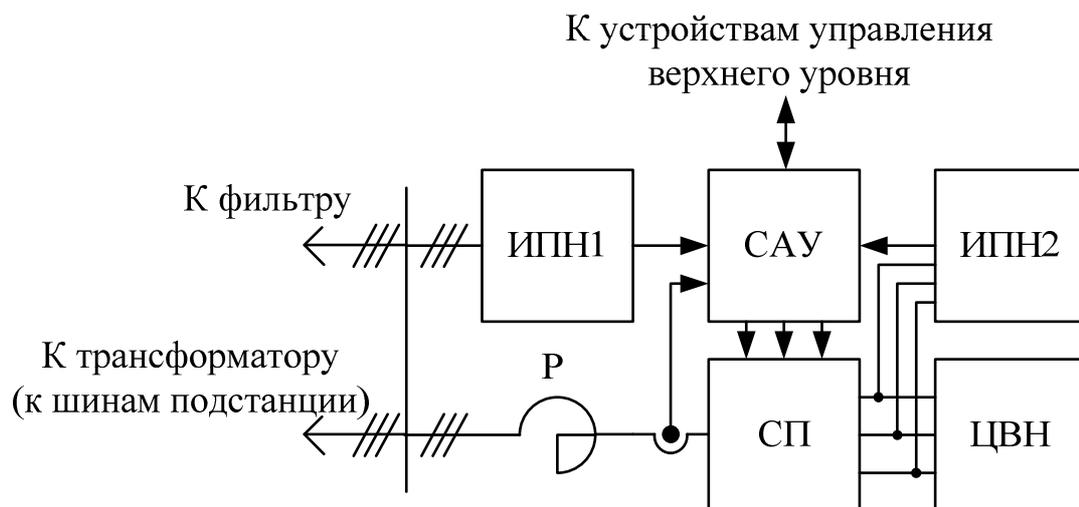


Рис. 1.1. Структурная схема СТАТКОМ

Силовая схема установки СТАТКОМ, согласно приведенной на рисунке 1.1 структурной схеме, содержит СП, в цепь выпрямленного напряжения (ЦВН) которого включен накопитель энергии, обычно конденсаторные батареи (КБ). На трехфазной стороне СП устанавливается трехфазная группа сглаживающих ток реакторов (Р). Обычно СТАТКОМ включают в сеть высокого напряжения через согласующий трансформатор. Поскольку СП генерирует высшие гармоники, максимальная амплитуда которых наблюдается на частоте коммутации вентилях СП, то для соблюдения требований электромагнитной совместимости [15] в обязательном порядке используется фильтр. Для обеспечения регулирования САУ получает информацию от первичных измерительных преобразователей напряжения (ИПН) и тока на стороне трехфазного и выпрямленного напряжения СП. Для согласованного управления процессами и режимами в ЭЭС САУ СТАТКОМ получает управляющие воздействия от верхнего уровня, например от комплекта устройств регулирования подстанции, от автоматизированной системы управления режимом, или из объединенного диспетчерского управления.

Основным применением СТАТКОМ в ЭЭС является стабилизация напряжения и регулирование реактивной мощности (РМ), при этом СТАТКОМ подключается параллельно сети (рисунок 1.2, а).

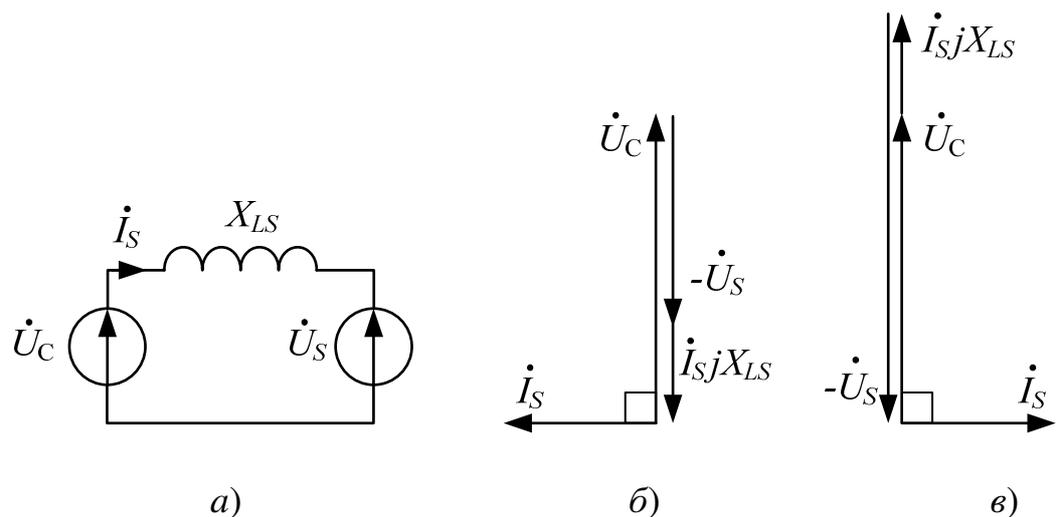


Рис. 1.2. Эквивалентная схема и векторные диаграммы параллельной работы СТАТКОМ с электрической сетью

Принцип действия СТАТКОМ иллюстрируют векторные диаграммы на рисунке 1.2. Если пренебречь потерями в СТАТКОМ, то при одинаковой фазе напряжений сети U_C и трехфазной стороны СП U_S , ток в реакторе с индуктивным сопротивлением X_{LS} пропорционален разности этих напряжений и отстает от U_C на 90° при $U_S < U_C$ (рисунок 1.2, в) и опережает на 90° при $U_S > U_C$ (рисунок 1.2, б). При этом полная мощность S СТАТКОМ может быть определена по выражению (1.1) [2, 12].

$$S = 3 \frac{U_C U_S}{X_{LS}} \sin(\alpha) - j3 \left(\frac{U_C U_S}{X_{LS}} \cos(\alpha) - \frac{U_C^2}{X_{LS}} \right) = P - jQ. \quad (1.1)$$

где P и Q – активная и реактивная составляющие мощности, потребляемые СТАТКОМ из сети;

α – угол между векторами напряжений сети и СП.

При $\alpha = 0$ СТАТКОМ не потребляет активную мощность вне зависимости от амплитуд векторов напряжений. При опережении напряжением U_S напряжения U_C , то есть $\alpha > 0$, существует выпрямительный режим работы СП, в результате которого СТАТКОМ потребляет активную мощность и запасает энергию в ЦВН. При использовании в ЦВН КБ запасание энергии приводит к увеличению напряжения на КБ. Аналогично,

отставание напряжения U_S от U_C , то есть при $\alpha < 0$, наблюдается рекуперация запасенной энергии ЦВН в сеть, а СП работает в инверторном режиме.

Статические характеристики СТАТКОМ, работающего в режиме стабилизации напряжения в точке присоединения представлены на рисунке 1.3. Реактивная мощность определена зависимостью от тока устройства и напряжения сети при угле $\alpha = 0$

$$Q = 3U_C \left(\frac{U_S - U_C}{X_{LS}} \right) = 3U_C I_S.$$

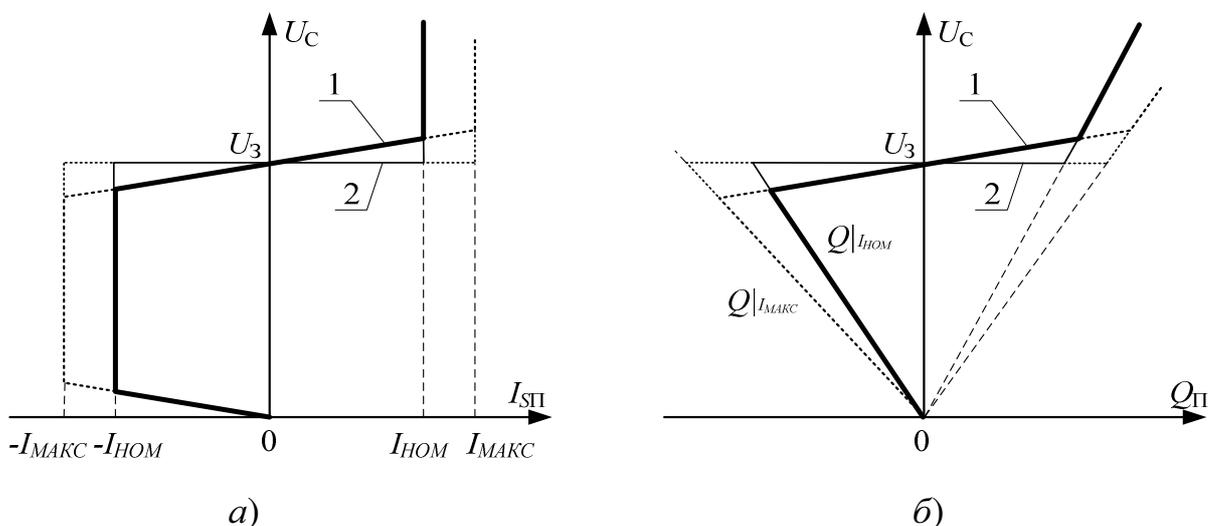


Рис. 1.3. Статические характеристики СТАТКОМ, работающего в режиме стабилизации напряжения:

- а) характеристика реактивного тока;
- б) характеристика реактивной мощности.

На рисунке 1.3 ток и мощность со значением больше нуля соответствуют режиму потребления, а меньше нуля – генерации РМ. Величина реактивного тока, потребляемого СТАТКОМ ограничена номинальным током в длительном режиме (сплошные линии) и предельно допустимым в кратковременном режиме работы с перегрузкой (пунктирные линии). Величина и продолжительность перегрузок определяется производителем и обычно находится в пределах 120–180 % [16]. В пределах допустимого значения тока в режиме стабилизации напряжения по заданной уставке U_3 СТАТКОМ может обеспечивать нулевую ошибку регулирования

(характеристики 2, рисунок 1.3) или регулировать со статической ошибкой (характеристики 1, рисунок 1.3) в зависимости от реализуемого САУ закона регулирования.

Формирование трехфазного напряжения U_S осуществляется с помощью широтно-импульсной (ШИМ), амплитудно-импульсной (АИМ) модуляций или их комбинации, в зависимости от топологии СП. Существует несколько основных топологий схем СП СТАТКОМ применяемых в основном в зависимости от класса напряжения и мощности установки [6, 12, 17–56]. Наиболее простой, с точки зрения управления и количества элементов, является трехфазная мостовая двухуровневая схема СП, представленная на рисунке 1.4.

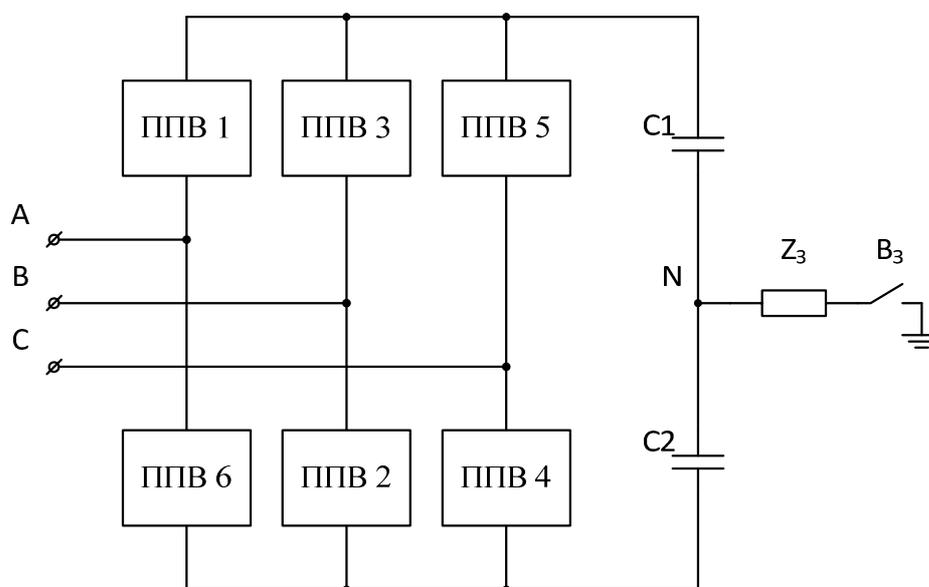


Рис. 1.4. Двухуровневая схема СП

Подобные схемы начали применять еще на демонстрационных образцах СТАТКОМ в начале 80-х годов в России и Японии, при этом были использованы электронно-лучевые вентили и не полностью управляемые *SCR*-тиристоры (*Silicon Controlled Rectifier*). Применение СТАТКОМ с данной топологией началось в 90-х годах уже на базе *GTO*-тиристоров (*Gate Turn-Off thyristor*), которые позволяли осуществлять низкочастотную коммутацию до 300 Гц [6].

К недостаткам данной схемы можно отнести высокий уровень генерации высших гармоник, что требует для поддержания качества напряжения установки мощных фильтров.

Снижение уровня генерации высших гармоник достигается за счет увеличения частоты широтно-импульсной модуляции и, соответственно, применением полностью управляемых ППВ. Снижение генерация высших гармоник в сеть также достигается увеличением пульсности схемы СТАТКОМ путем параллельного включения СП и смещения углов управления тиристоров при подключении к вторичным обмоткам трансформаторов с различными схемами включения [12], таким образом обычно увеличивают единичную мощность установки.

В конце 90-х начали применять трехуровневые схемы СП (рисунок 1.5) и в 1999 г. введен в эксплуатацию первый СТАТКОМ на IGBT транзисторах [48, 49].

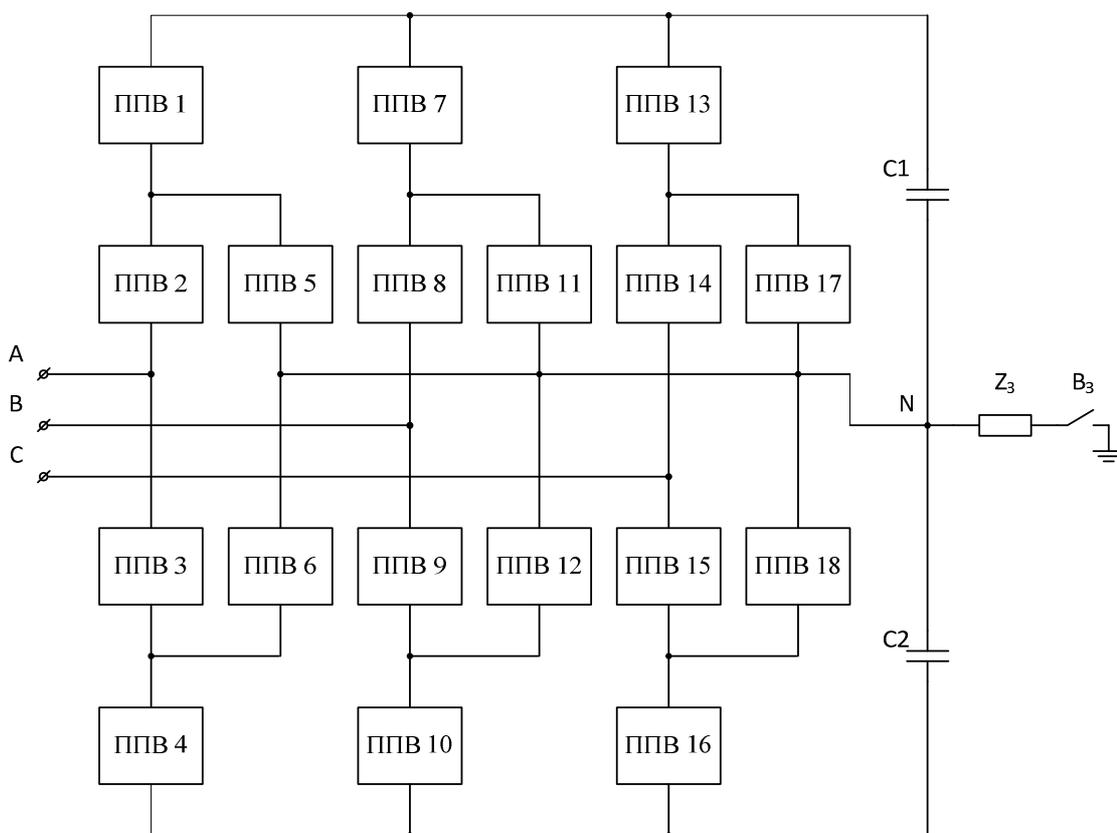


Рис. 1.5. Трехуровневая схема СП

Наличие трех уровней напряжения позволяет осуществлять совместную ШИМ и АИМ, что снижает генерацию высших гармоник СП. Несущая частота ШИМ обычно находится в диапазоне от 500 до 2000 Гц [12]. При прочих равных условиях СТАТКОМ с трехуровневым СП имеет коэффициент искажения синусоидальности напряжений приблизительно в 1,7 раз меньше, чем с двухуровневым и составляет ~4,5 % и ~6,5 % для трех- и двухуровневого соответственно. Действующее значение тока в фильтре так же меньше для трехуровневой схемы примерно в 1,5 раза [48, 49].

Трехуровневая мостовая схема является одной из наиболее перспективных схем СП для применения в устройствах FACTS, поскольку имеют бóльшую единичную мощность установки, по сравнению с двухуровневой, и позволяет объединять подобные СП по ЦВН.

Еще одним способом снижения амплитуд высших гармоник является повышение количества уровней модулируемого напряжения путем создания многомодульных однофазных преобразователей (рисунок 1.6), подобные СП также называют каскадными. Первая установка СТАТКОМ, использующая указанную топологию СП, введена в эксплуатацию в 1999 г. на подстанции Ист Клейдон [57]

Многомодульные СП позволяют путем увеличения количества последовательно соединяемых модулей получить требуемый класс напряжения установки, обычно более высокий по сравнению с двух- и трехуровневой топологиями, что означает возможность получения большей единичной мощности установки без усложнения трансформаторной части [ссылки на каскадные СТАТКОМ]. Однако отсутствие в явном виде ЦВН не позволяет производить объединения с подобными установками, что не позволяет применять данную топологию СП для объединенных регуляторов потоков мощности и вставок постоянного тока [58].

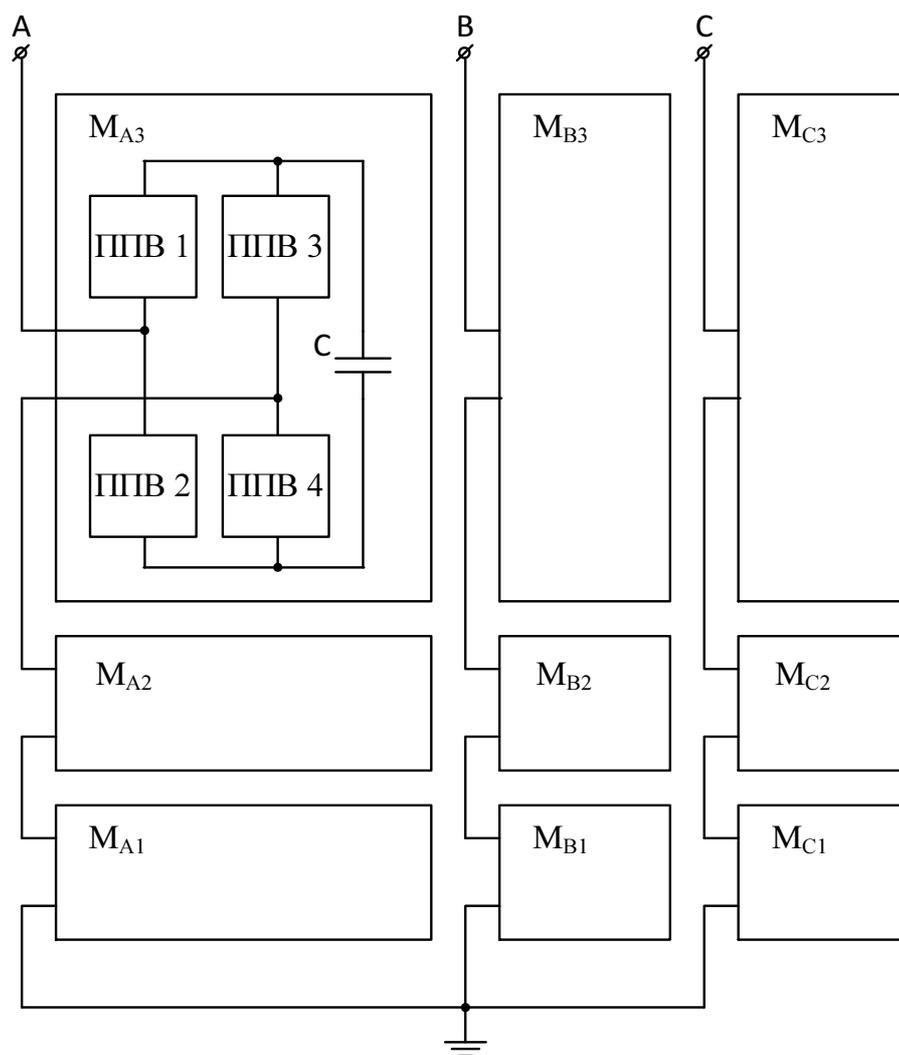


Рис. 1.6. Многомодульная схема СП

Двухуровневая, трехуровневая и многомодульная топологии СП с начала эксплуатации и до настоящего времени получили наибольшее распространение и их можно считать основными.

Иные топологии СП в целом отражают принципы реализации основных. Примером тому является разработка СТАТКОМ (рис. 1.7) с характеристиками, позволяющими подключать его к шинам подстанции без промежуточного трансформатора [41-44].

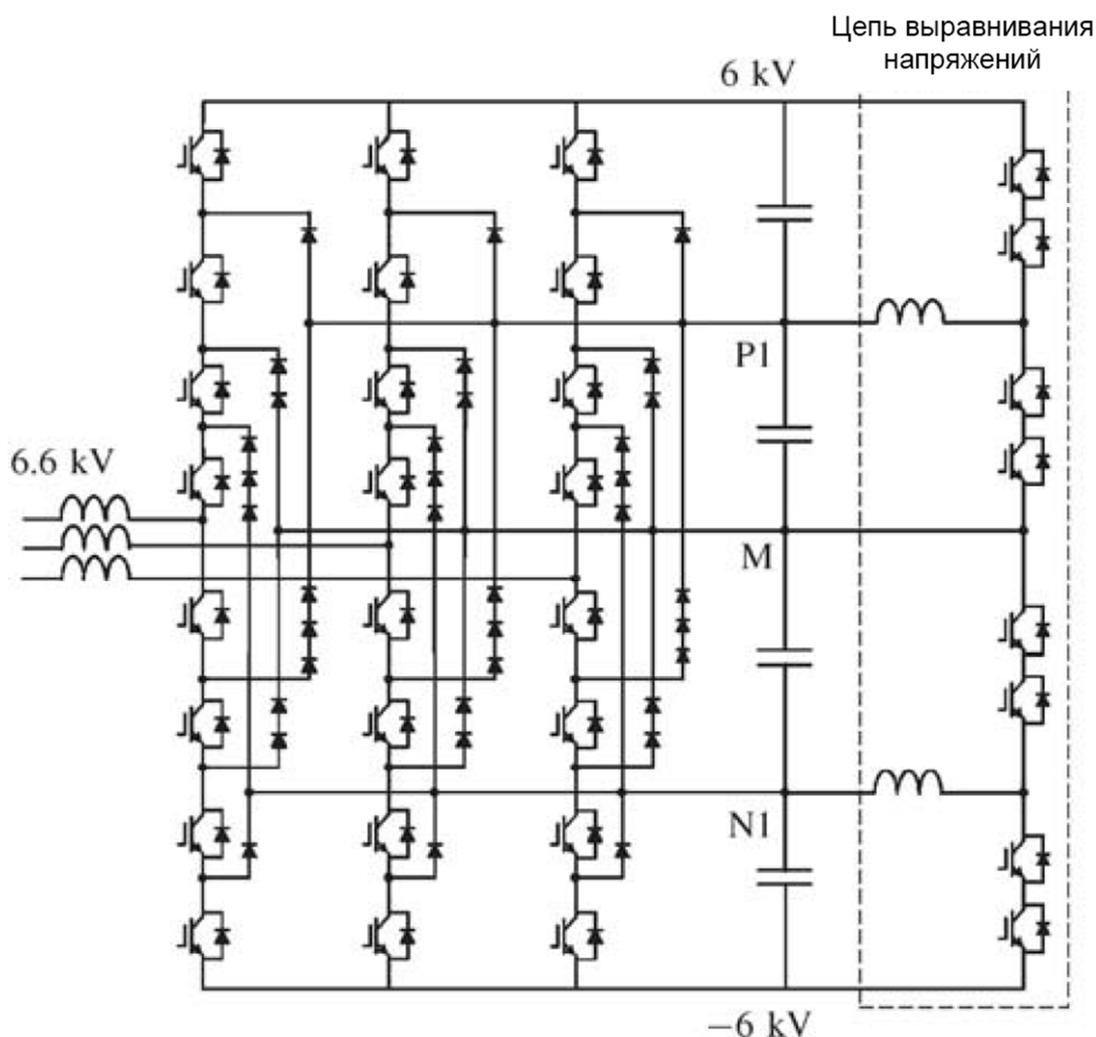


Рис. 1.7. Схема СТАТКОМ с четырехуровневым СП

Преобразователи, рассчитанные на работу с сетью с напряжением до 10 кВ, обычно имеют двухуровневую или трехуровневую топологию. В сети с напряжением свыше 10 кВ в настоящее время применяются многоуровневые и многомодульные СП. Во многом это определяется рабочими характеристиками ПП ключей, выпускаемых промышленностью для данного применения (таблица 1.1) [58-65].

Таблица 1.1. Параметры ПП ключей, выпускаемых промышленностью

Тип ПП ключа	Максимальный рабочий ток, кА	Максимальное рабочее напряжение, кВ	Диапазон частоты коммутации, Гц
<i>SCR</i> -тиристор	6	8,5	50–250
<i>GTO</i> -тиристор	6	6	50–500
<i>IGCT</i> -тиристор	5,6	6	500–2000
<i>IGBT</i> -транзистор	3,5	3	500–5000

Пределы диапазонов рабочих токов и напряжений, главным образом, определяются рассеиваемой мощностью ПП ключа, а поскольку мощность СТАТКОМ определяется допустимыми рабочими токами и напряжениями, то для увеличения мощности установок СТАТКОМ применяется последовательное или параллельное соединение ключевых элементов в один ППВ [53, 66]. Несмотря на увеличение мощности потерь в таком ППВ, потери в отдельных ключевых элементах находятся в пределах допустимых. Однако при этом необходимо увеличивать запасы по току и напряжению ключевых элементов, так как технологический процесс производства не позволяет получить полностью идентичные статические и динамические характеристики ПП ключей, и падение напряжений на последовательно соединенных ключах или токи в параллельных ключах не абсолютно идентичны. С ростом частоты ШИМ выше установленной производителем, увеличиваются коммутационные потери в ключе, что также требует снижать рабочие напряжения и токи из условия допустимых потерь. Это, безусловно, приводит к снижению экономической эффективности установки.

Установки СТАКОМ, мощность которых не превышает 50 МВА, в основном имеют двухуровневую или трехуровневую топологии. Преобразователи большой мощности (свыше 50 МВА) обычно выполняются многомодульными и могут состоять из восьми–десяти модулей, что позволяет получить напряжение близкое по форме к синусоидальному. В

многомодульных и многоуровневых преобразователях применяется сочетание амплитудно-импульсной и широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что улучшает качество выходного напряжения и снижает требуемую мощность фильтра [73].

Потери в СТАТКОМ складываются из потерь в трансформаторе, реакторе, в цепях измерения и управления, в СП, потери в соединительных проводах, потери в фильтре (на высшие гармоники). Кроме того СТАТКОМ потребляет активную мощность для собственных нужд, например питания станции управления [16].

Современные электротехнические устройства, предназначенные для автоматизации процессов в энергетике и в транспортных сетях различного рода, такие как устройства FACTS и автоматизированные электроприводы, имеют векторную систему регулирования. Векторное управление в отличие от скалярного позволяет расширить диапазон регулирования, повысить быстродействие за счет несимметричного трехфазного управления при регулировании по амплитуде и по фазе. Построения векторных САУ выполняются во вращающихся системах координат. В частности для электроприводов направление одной из осей координат по вектору потокосцепления ротора позволяет значительно упростить систему управления и осуществить раздельное (независимое) управление током и магнитным потоком, а значит и электромагнитным моментом двигателя. В СТАТКОМ направление одной из осей вращающейся системы координат напряжения (тока) по вектору напряжения (тока) позволяет независимо, в широком диапазоне и с высоким быстродействием регулировать реактивную и активную составляющие мощности потребляемые устройством из сети или генерируемые в сеть [74–93]. Для согласования измеряемых трехфазных сигналов и входных/выходных данных системы управления применяется прямое преобразование координат (ППК) из трехфазной неподвижной ABC в двухфазную вращающуюся dq -систему координат и обратное

преобразование координат (ОПК) из двухфазной вращающейся в трехфазную неподвижную.

Поскольку алгоритмы САУ СТАТКОМ достаточно сложны, то ее реализация выполняется в цифровом виде на базе микропроцессорной техники [74]. Вычислительные ресурсы доступные на современной элементной базе позволяют осуществлять расчет алгоритмов управления с частотой дискретизации в несколько десятков килогерц.

Обычно САУ СТАТКОМ содержит алгоритмы фильтрации зашумленных входных сигналов от первичных измерительных преобразователей, синхронизации по вектору напряжения сети, ППК и ОПК, вычисления мощностей и их составляющих, расчета уставок и регуляторов ортогональных составляющих вектора напряжения (тока) СП. Функциональная схема САУ СТАТКОМ приведена на рисунке 1.8.

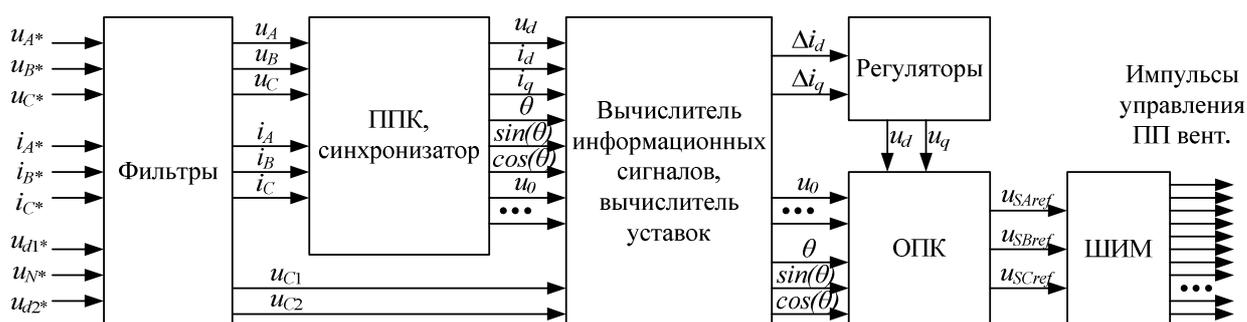


Рис. 1.8. Функциональная схема САУ СТАТКОМ

Существующие САУ СТАТКОМ позволяют осуществлять реверс РМ за несколько периодов сетевой частоты [75-82]. На физической модели СТАТКОМ в НТЦ «Электроэнергетики» было достигнуто время полного реверса РМ за 1,5 периода [92].

На основании анализа схем, характеристик и САУ СТАТКОМ средства его моделирования и ЭЭС в целом должны обладать следующими характеристиками:

1. Обеспечение трехфазного моделирования, что определяется принципами векторного регулирования, несимметричными и междуфазными взаимодействиями;

2. Широкий диапазон частот, не менее 10 кГц, адекватного воспроизведения спектра высших гармоник СП, что определяется высокими частотами коммутации;
3. Возможность моделирования различных САУ СТАТКОМ, и информационно-управляющих систем электрических сетей и ЭЭС;
4. Обеспечение моделирования на длительном, в общем случае неограниченном, интервале времени;
5. Наличие моделей силового оборудования, входящего в состав СТАТКОМ (СП, фильтров и пр.) и моделей систем управления;
6. Универсальность структуры и параметров модели СТАТКОМ;
7. Возможность моделировать всевозможные нормальные и аномальные режимы работы основного силового оборудования и ЭЭС в целом.

Кроме того желательно иметь возможность моделирования в реальном времени для обеспечения сопряжения с реальным оборудованием в целях тестирования релейной защиты, станций управления, тренажа диспетчерского персонала.

1.2 Средства моделирования функционирования статических синхронных компенсаторов в электроэнергетических системах

В настоящее время для исследования функционирования СТАТКОМ, как и других устройств FACTS, используют математические или физические методы моделирования [34, 48, 49, 74–81]. Первое, в основном, подразумевает решение дифференциальных уравнений, описывающих процессы в оборудовании, цифровыми программными средствами моделирования (EUROSTAG, Mustang, PSCAD, Matlab, RTDS).

Физические силовые модели применяются для исследования процессов в СТАТКОМ, в абстрагированных от процессов в ЭЭС условиях [48, 49, 92].

Указанное направление не соответствует цели данной диссертационной работы и рассмотрению не подлежит.

На сегодняшний день тенденции развития смещены и будут смещены в обозримом будущем в сторону цифровых программных средств моделирования, поскольку интенсивное развитие вычислительной техники за последние десятилетия привело к абсолютной доступности персональных компьютеров и доступности для исследователей вычислительных ресурсов суперкомпьютеров. Вместе с тем, параллельно развивались и ПК, предназначенные для решения всевозможных задач моделирования ЭЭС. Данные цифровые программные средства моделирования ЭЭС широко применяются для проведения научных исследований, практической разработки и в сфере образования.

Наряду с доступностью цифровые средства моделирования обладают рядом достоинств: относительно невысокая стоимость, гибкость, удобная интерфейсная среда, упрощающая использование и восприятие результатов моделирования, возможность автоматического анализа объекта моделирования и работы с базами данных. Сопутствующими широкому распространению цифровых средств моделирования факторами, безусловно является наличие информационной среды, которая обеспечивает ее участников доступной литературой, для быстрого самостоятельного освоения, легкой трансляцией получаемых результатов другим исследователям и разработчикам, что способствует развитию программных средств моделирования и прогрессу в целом.

При этом «несмотря на достижения в развитии вычислительной техники и программных средств моделирования процессов в ЭЭС, задача достаточно полного достоверного и оперативного моделирования непрерывного спектра нормальных и аномальных процессов в многомерных ЭЭС неизменно представляет для них одну из наиболее сложных и наименее решенных проблем» [96].

При цифровом моделировании, применяются методы численного решения систем дифференциальных уравнений, описывающих непрерывные процессы в ЭЭС. При использовании численных методов решения неизбежно возникает неопределенная погрешность на каждом шаге расчета, эта погрешность может накапливаться и приводить к существенной ошибке получаемого результата моделирования. При этом неопределенность погрешности не позволяет определить и значение наколенной ошибки. С ростом размерности модели, с уменьшением шага интегрирования, связанным с потребностью воспроизведения процессов с малыми постоянными времени, и увеличением интервала времени моделирования возрастает вероятность накопления ошибки [13, 14, 96]. В связи с этим в программных комплексах расчета режимов и процессов становится неизбежным применение допущений и упрощений математических моделей оборудования и ЭЭС в целом.

В качестве примера приведены получившие признание различных пользователей: системных операторов, проектировщиков и исследователей; программы для моделирования процессов в ЭЭС, такие как EUROSTAG, Mustang, PSCAD. ПВК EUROSTAG специализирован для исследования процессов в крупных ЭЭС. Модель статического синхронного компенсатора в данном ПВК эквивалентирована управляемым однолинейным источником тока, в модели не учитываются процессы в СП и на стороне выпрямленного напряжения. В ПВК Mustang модель СТАТКОМ пока не реализована, но при ее реализации будет иметь те же упрощения и допущения, что и в EUROSTAG.

Среда моделирования PSCAD с расчетным ядром EMTDS лучше приспособлена к моделированию СТАТКОМ и других устройств FACTS, более того в библиотеке элементов приведена модель СТАТКОМ, с учетом схемотехнической реализации и САУ. Это позволяет достаточно адекватно моделировать быстропротекающие процессы на непродолжительном временном интервале, однако при этом необходимо уменьшать шага

интегрирования до единиц микросекунд. В результате уменьшения шага интегрирования вероятная величина накапливаемой ошибки возрастает, а время моделирования быстропротекающих процессов может на порядки превысить реальный масштаб времени. Моделирование реальных энергосистем, ввиду больших размерностей моделей и применяемых в них упрощений, выполняется с большим шагом интегрирования, что не позволяет адекватно воспроизводить процессы в СТАТКОМ и учитывать его влияние на процессы в ЭЭС. Аналогичная ситуация наблюдается и в программной среде Simulink ППК Matlab, в которой существует несколько моделей, учитывающих схемотехническую реализацию или эквивалентированные трехфазным источником тока. Возможности Matlab/Simulink позволяют создавать свои устройства FACTS, используя стандартную библиотеку элементов, разрабатывать алгоритмы САУ [94]. Однако такой подход неприменим для моделирования длительных режимов и процессов в ЭЭС и может применяться только для моделирования локального участка сети, что не соответствует поставленным требованиям.

Помимо невозможности моделирования всего спектра режимов крупных энергосистем без принципиально значимых упрощений, программные средства моделирования ЭЭС не позволяют осуществлять моделирование в реальном времени. Для реализации этой возможности существуют программно-аппаратные средства моделирования типа комплекса RTDS (RTDS Technologies Inc., Канада). Такие комплексы обладают всеми преимуществами и недостатками программных средств моделирования, однако позволяют осуществлять их сопряжение с внешним оборудованием [96].

Наличие интерфейса взаимодействия с внешним оборудованием позволяет создавать, к примеру, физические модели оборудования и осуществлять их моделирование, в том числе и СТАТКОМ, с учетом действия ЭЭС, модель которой реализована цифровыми средствами моделирования. Физическая модель позволяет добиться высокой

адекватности, однако не позволяет осуществлять моделирование тяжелых аварийных режимов, управление параметрами и структурой. Для решения задач автоматизации управления процессами и режимами физические модели требуют создания интерфейсов для взаимодействия с контроллером верхнего уровня.

Трехфазное моделирование всевозможных нормальных и аномальных режимов и процессов в широком диапазоне частот и на длительном временном интервале позволяет осуществлять разработанный в Томском политехническом университете Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС). Он предназначен для трехфазного бездекомпозиционного моделирования всего спектра процессов в ЭЭС и способен осуществлять непрерывное, вследствие применяемого метода и инструментальных средств, моделирование в реальном времени и на неограниченном интервале. ВМК РВ ЭЭС обеспечивает моделирование процессов без методической ошибки и с гарантированной необходимой инструментальной точностью. ВМК РВ ЭЭС способен воспроизводить коммутационные процессы в ЭЭС и, следовательно, обладает возможностью моделирования в широком диапазоне частот [91].

ВМК РВ ЭЭС не содержит моделей СТАТКОМ, однако в его составе есть модели синхронных генераторов с цифровыми САУ, что означает возможность построения различных систем регулирования, включая САУ СТАТКОМ.

В результате анализа средств моделирования функционирования СТАТКОМ в ЭЭС сделан вывод, что существующие средства моделирования не позволяют осуществлять всережимное моделирование функционирования СТАТКОМ в ЭЭС в реальном времени, по следующим основным причинам:

1. Без значимых упрощений цифровые средства моделирования применимы только для небольших участков сети и на небольшом временном интервале.

2. При моделировании реальных энергосистем модель СТАТКОМ замещается источником тока, и учитывается лишь упрощенная его реакция на возмущения в ЭЭС.

3. Физические модели не позволяют осуществлять управление их параметрами, воспроизводить аварийные режимы, что сильно сужает область исследований.

1.3 Выбор и обоснование направления решения проблемы моделирования статических синхронных компенсаторов в ЭЭС

Существующие цифровые средства моделирования в значительной мере ограничивают возможности моделирования для решения задач проектирования, исследования и эксплуатации СТАТКОМ в ЭЭС. Решение подобных задач в полной мере могут обеспечить гибридные средства моделирования, поэтому на основании анализа средств моделирования СТАТКОМ в ЭЭС принято решение о разработке программно-технических средств всережимного моделирования в реальном времени статических синхронных компенсаторов ориентированных, главным образом, на применение в составе ВМК РВ ЭЭС. Концепция и средства ВМК РВ ЭЭС позволяют реализовать непрерывное трехфазное всережимное моделирование СТАТКОМ с учетом САУ и в составе ЭЭС на неограниченном интервале времени. Возможность моделирования в реальном времени позволяет, при наличии соответствующих интерфейсов, решать задачу тестирования станций управления СТАТКОМ, в том числе с учетом процессов в ЭЭС.

Концепцию «всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем», предложенную в [45, 49, 61], кратко можно раскрыть следующим образом:

1. Основу ВМК РВ ЭЭС составляют специализированные гибридные процессоры (СГП), каждый из которых содержит сопроцессоры

моделируемого силового оборудования. Сопроцессоры обеспечивают решение методом непрерывного неявного интегрирования систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы в генераторах, трансформаторах, линиях электропередач и другом оборудовании ЭЭС. Все сопроцессоры силового оборудования имеют цифро-аналоговую структуру, что позволяет в реальном времени управлять коэффициентами и параметрами их моделей.

2. Сопроцессоры дополняются преобразователями напряжение-ток (ПНТ), преобразующими непрерывные математические переменные фазных токов в модельные физические токи. Наличие модельных физических трехфазных входов-выходов СГП позволяет воспроизводить всевозможные продольные и поперечные коммутации с помощью цифруправляемых аналоговых ключей (ЦУАК) и практически неограниченно наращивать модель ЭЭС.

3. Каждый СГП содержит блок микропроцессоров, состоящий из центрального процессора (ЦП) и периферийных процессоров. Все ЦП соединяются между собой и с Сервером по единой локальной компьютерной сети, а цифровыми шинами с периферийными процессорами и цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП) сопроцессора данного СГП. БМ и его программное обеспечение предназначены для осуществления всех присущих данному виду СГП информационно-управляющих свойств и возможностей: моделирования релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики и др.

4. Каждый СГП для внешнего и внутреннего взаимодействия оснащен программными и программно-техническими интерфейсами, включая аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

ВМК РВ ЭЭС позволяет воспроизводить своими средствами реальные подсистемы: сбора, обработки и передачи данных, РЗ и ПА, управления, сигнализации, а также информационный обмен между ними. При этом

обеспечивается возможность взаимодействия с указанными подсистемами реального объекта в режиме реального времени.

ВМК РВ ЭЭС имеет многоуровневую структуру информационной модели, рассредоточенную по различным программным и аппаратным уровням.

Первый уровень информационной структуры модели локализован периферийными процессорами. На данном уровне реализованы: выборки мгновенных значений с дискретностью 100–200 мкс, расчет действующих значений, формирование векторных измерений, контроль и управление состоянием коммутационного оборудования и другими параметрами и элементами моделируемой схемы, а также интерфейс взаимодействия с верхними уровнями информационной модели.

Второй уровень информационной модели ограничен уровнем ЦП СГП и реализует функции сбора, обработки и передачи первичной информации от нижнего уровня информационной структуры модели к третьему уровню. ЦП также выполняют передачу управляющего воздействия на нижний уровень информационной модели. ЦП на программном уровне реализуют базовые алгоритмы релейной защиты и противоаварийной автоматики, группового управления элементами энергосистемы в пределах одного СГП и находящихся в подчинении периферийных процессоров. Временные характеристики информационного обмена второго уровня ВМК РВ ЭЭС находятся в диапазоне 500–800 мкс со стороны нижнего уровня и 10–100 мс со стороны следующего уровня информационной структуры модели.

Взаимодействие между СГП реализовано на третьем уровне информационной структуры модели и обеспечивается Сервером. Сервер ВМК РВ ЭЭС реализует функцию представления информационной модели, алгоритмы оптимального управления режимами работы оборудования, алгоритмы РЗА, формирования и представления интерфейсов взаимодействия СГП ВМК РВ ЭЭС и программных клиентов. Времена предоставления данных в информационной модели, обрабатываемой

Сервером ВМК РВ ЭЭС, находятся в диапазоне 10–100 мс с уровнем ЦП СГП.

Верхний уровень информационной модели формируется программными и программно-аппаратными Клиентами ВМК РВ ЭЭС, в том числе специализированным клиентом и выполняет функции реализации внешнего взаимодействия модели по различным интерфейсам. Такими интерфейсами выступают: протоколы верхнего уровня телемеханики; человеко-машинный интерфейс, реализованный через динамические панели наблюдения и управления; интерфейсы моделирования сценариев режимов и их задания; интерфейс отработки различных алгоритмов общесистемного управления в специализированном клиенте.

Разрабатываемые программно-технические средства (ПТС) моделирования функционирования СТАТКОМ в ЭЭС должны обладать следующими характеристиками:

1. Обеспечивать трехфазное всережимное бездекомпозиционное моделирование в широком диапазоне частот (до 10 кГц), в реальном времени и на неограниченном интервале всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимов и процессов в СТАТКОМ, в том числе в составе ЭЭС;
2. Иметь универсальные модели силового оборудования и САУ СТАТКОМ, и обеспечить управляемость и наблюдаемость их структур, параметров и процессов.

Для разработки ПТС моделирования СТАТКОМ необходимо создать аппаратные цифро-аналоговые средства моделирования – гибридный процессор СТАТКОМ (ГПС) и программные средства реализации его информационно-управляющих функций на всех информационных уровнях.

Согласно обобщенной структурной схеме СТАТКОМ (рисунок 1.1) ГПС должен содержать сопроцессоры трехфазного силового оборудования: трансформатора, фильтра, реактора и ЦВН. Реализация СП в виде сопроцессора затруднительна, поскольку управление параметрами модели в

цифро-аналоговой схеме не обеспечивает достаточного уровня быстродействия для моделирования высокочастотной коммутации ППВ СП. Поэтому моделирование СП, как и продольной и поперечной коммутации, должно осуществляться на физическом уровне с помощью ЦУАК, которые обеспечивают простое и быстрое логическое управление, высокое быстродействие при коммутации и параметры в замкнутом и разомкнутом состоянии, позволяющими представить их идеальными ключами. Воспроизведение потерь в реальном СП следует осуществлять в сопроцессоре реактора или ЦВН, для обеспечения возможности их управления и наблюдения. Учет типа ППВ производится закладываемыми алгоритмами коммутации на цифровом уровне в блоке микропроцессоров.

Поскольку САУ современных СТАТКОМ реализуют средствами цифровой техники [27, 69], ввиду сложности алгоритмов, то моделирование САУ следует производить в блоке микропроцессоров ГПС, а именно в периферийных процессорах. Периферийные процессоры работают в жестком реальном времени и обеспечивают достаточные временные характеристики для моделирования САУ СТАТКОМ, несущая частота коммутации ППВ СП которых находится в пределах 10 кГц.

ПТС моделирования СТАТКОМ должны быть разработаны в соответствии с концепцией всережимного моделирования и адаптированы для применения в структуры информационной системы ВМК РВ ЭЭС.

2 ГИБРИДНЫЙ ПРОЦЕССОР СТАТКОМ

Для сопроцессоров ГПС, разработаны математические модели силового оборудования в соответствии с выбранным направлением решения проблемы моделирования СТАТКОМ. Для разработки всережимной модели силового оборудования, в соответствии с методикой построения всех специализированных гибридных процессоров в ВМК РВ ЭЭС [98], выполнен анализ принципиальных схем, режимов и условий работы моделируемого оборудования, синтезированы адекватные схемы замещения и соответствующие им всережимные математические модели.

Для разработки модели САУ аналогичным образом проведен анализ существующих принципов и алгоритмов управления, определены необходимые и достаточные функциональные блоки и алгоритмы САУ для функционирования ГПС во всевозможных режимах работы.

2.1 Синтез всережимной модели оборудования СТАТКОМ

Анализ литературы показал (п. 1.1), что при большом разнообразии схемотехнических решений, одной из наиболее перспективных схем является схема СТАТКОМ с трехуровневым СП, приведенная на рисунке 2.1. Подключение к сети осуществляется через двухобмоточный трансформатор со схемами соединения обмоток $Y-Y$ или $Y-\Delta$, либо через трансформатор с расщепленной обмоткой, при этом к одной из обмоток подключен СТАТКОМ, а вторая используется для подключения фильтра.

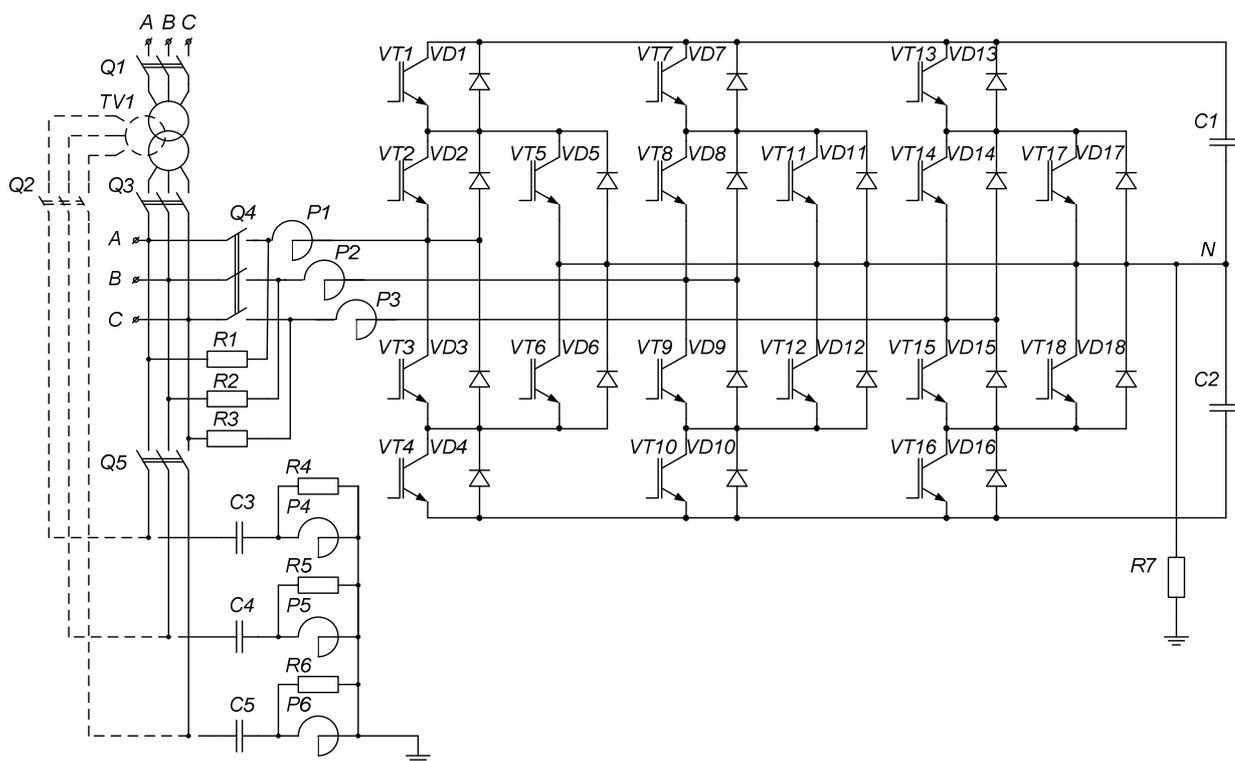


Рис. 2.1. Электрическая принципиальная схема СТАТКОМ с трехуровневым СП на полностью управляемых ППВ вентилях

При пуске СТАТКОМ на время заряда конденсаторных батарей выключатель $Q4$ разомкнут и ток заряда ограничен сопротивлениями $R1-R3$, после чего $Q4$ шунтирует сопротивления [48, 49]. В нормальном режиме работы СТАТКОМ выключатели $Q1$, $Q3$, $Q4$ и $Q5$ ($Q2$) находятся в замкнутом состоянии. Коммутация ППВ $VT1-VT18$ производится в соответствии с алгоритмами САУ, не допускающими одновременной подачи сигналов на вентили различных плеч моста, а сами вентили имеют приблизительно равные параметры. Также приблизительно равны между собой параметры элементов по всем фазам и емкости КБ на стороне выпрямленного напряжения СП. Сопротивление $R7$, включенное между контуром заземления и общей точкой КБ применяется для ограничения токов нулевой цепи N . Значения токов и напряжений в нормальном режиме не превышают номинальных значений установленного оборудования.

Ненормальные режимы, не приводящие к повреждению оборудования СТАТКОМ образуют: несимметрии по фазам, кратковременные превышения

тока или напряжения, неравенство напряжений на полюсах СП, отключение фильтра, обрыв цепей заземления нулевых точек КБ или фильтра.

Аварийные режимы работы СТАТКОМ в ЭЭС определяют все воздействия на оборудование СТАТКОМ, приводящие его в данное состояние [97]:

- Перенапряжения;
- Перегрузки по току;
- Перегрузки по мощности в быстропротекающих процессах;
- Тепловые перегрузки в медленно протекающих процессах.

Аварийные перенапряжения, могут быть как внешними, так и внутренними, и характеризуются уровнем, длительностью и скоростью изменения, не соответствующими проектным параметрам оборудования.

Внешние перенапряжения возникают в точке присоединения СТАТКОМ к сети и связаны с процессами в ЭЭС. Внутренние перенапряжения связаны с процессами в оборудовании СТАТКОМ. Причинами внутренних аварийных режимов могут быть [100]:

- Нарушения в работе САУ, потеря управляемости вентилях с изменением порядка их переключений;
- Существенное изменение схемы или параметров силового оборудования из-за пробоя изоляции или пробоя одного или нескольких вентилях;
- Комбинация указанных причин.

Подобные аварийные режимы сопровождаются протеканием повышенных токов, и недопустимыми тепловыми и электродинамическими воздействиями на оборудование. Вместе с тем большинство внутренних аварий не приводит к значительным изменениям токов в элементах силовой цепи. Результатом таких аварий обычно являются отклонения напряжения в точке присоединения и повышенный уровень пульсаций на стороне выпрямленного напряжения.

Представленная принципиальная схема СТАТКОМ и отмеченная общность принципов построения всех СГП ВМК РВ ЭЭС с учетом совокупности обозначенных обстоятельств определяют представленную на рисунке 2.2 структурную схему ГПС.

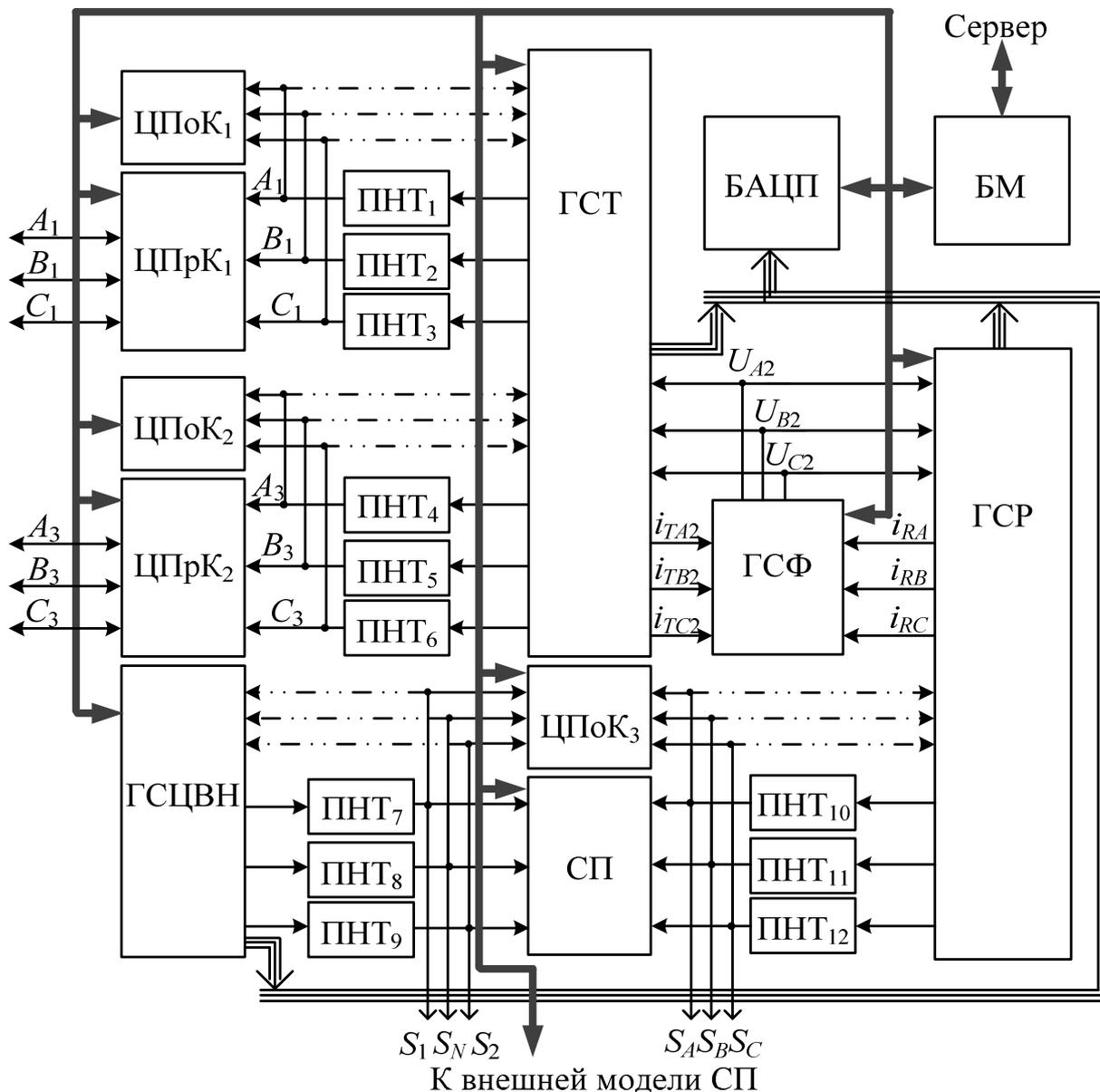


Рис. 2.2. Структурная схема гибридного процессора СТАТКОМ

ГПС содержит гибридные сопроцессоры трансформатора (ГСТ), фильтра (ГСФ), реактора (ГСР), цепи выпрямленного напряжения (ГСЦВН) и СП. Сопроцессоры выполняют непрерывное решение дифференциальных уравнений математических моделей оборудования СТАТКОМ (2.1–2.4). Результат решения посредством блока аналого-цифрового преобразования

(БАЦП) поступает в блок микропроцессоров (БМ). БМ осуществляет весь спектр преобразований данных, необходимый для наблюдения за процессом моделирования, управления в реальном времени параметрами моделей силового оборудования, состояниями цифруправляемых продольных (ЦПрК) и поперечных коммутаторов (ЦПоК), и СП в соответствии с заданными режимами работы, типом ППВ и алгоритмами САУ СТАТКОМ. Выполнение алгоритмов САУ также реализовано в БМ. Использование цифруправляемых аналоговых ключей позволяет адекватно воспроизводить коммутационные процессы СП на модельном физическом уровне.

Изменение состояния ключей продольной и поперечной коммутации позволяет воспроизвести следующие виды аномальностей: всевозможные междуфазные замыкания и замыкания на землю, путем запрета на управление ключами СП и установки их состояния в то или иное положение могут быть смоделированы несимметричные и аварийные режимы работы СП, указанные выше. Пофазное управление всех параметров позволяет смоделировать обрывы цепей, любые несимметрии в фазах установки. Перечисленные аномальности практически полностью перекрывают возможные режимы работы СТАТКОМ. Моделирование пусковых токоограничивающих резисторов (для заряда конденсатора) можно осуществлять изменением в реальном времени значения активного сопротивления в модели реактора.

СП, реализованный на модельном физическом уровне, предусматривает возможность моделирования работы трехуровневого и двухуровневого СП. Для моделирования СТАТКОМ с другими топологиями СП в ГПС предусмотрены физические выходы S_A , S_B , S_C , S_1 , S_N , S_2 и выход цифровой шины. Эти выходы позволяют подключать независимо разработанные модели СП, а также позволяют объединять аналогичные СП по ЦВН.

Схема замещения части СТАТКОМ включающей в себя реакторы, пусковые резисторы, статический преобразователь и ЦВН представлена на

рисунке 2.3. Применяемое разделение на основные части и соответствующие им сопроцессоры позволяет осуществлять отдельный синтез математического описания силового оборудования СТАТКОМ и выполнять независимые разработку и исследования средств программно-технической их реализации.

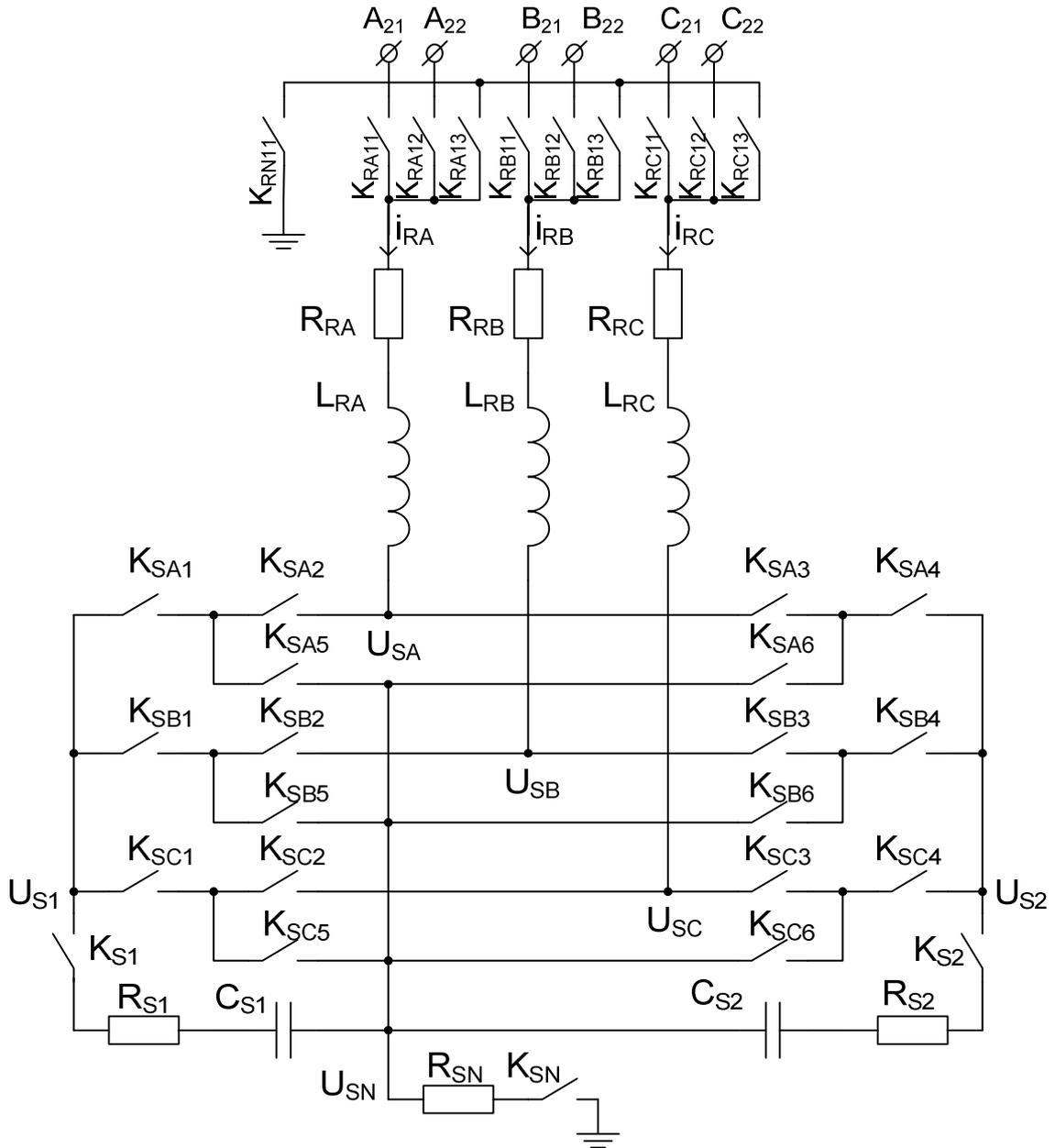


Рис. 2.3. Схема замещения реакторов, статического преобразователя и цепи выпрямленного напряжения СТАТКОМ

K_{SAi} , K_{SBi} , K_{SCi} – идеальные ключи, замещающие ППВ СП;

R_{Si} – суммарные активные сопротивления в ЦВН;

$C_{S1} = \sum C_{S1k}, C_{S2} = \sum C_{S2k}$ – суммарные емкости КБ.

L_{RA}, L_{RB}, L_{RC} – индуктивности токоограничивающих реакторов;

R_{RA}, R_{RB}, R_{RC} – суммарные сопротивления в фазах СТАТКОМ, равные суммам активных сопротивлений реактора, пускового токоограничивающего резистора и сопротивления, эквивалентирующего потери в фазе СП;

Процессы в фазе A, B и C реакторной цепи идентичны и для фазы A описаны уравнением:

$$\frac{di_{RA}}{dt} = \frac{1}{L_{RA}} (U_{TA2} - U_{SA} - i_{RA}R_{RA}) \quad (2.1)$$

где i_{RA} – ток реактора фазы A ;

U_{TA2} – напряжение на выводе вторичной обмотки трансформатора;

U_{SA} – напряжение фазы A СП.

Всережимная модель конденсаторных батарей в цепи выпрямленного напряжения выражена системой уравнений (2.2):

$$\begin{cases} i_{CSj} = \frac{1}{R_{Sj}} (U_{SN} - U_{CSj}); \\ \frac{dU_{CSj}}{dt} = \frac{1}{C_{Sj}} i_{CSj}, \end{cases} \quad (2.2)$$

где i_{CSj} – ток конденсаторной батареи;

R_{Sj}, C_{Sj} – эквивалентное сопротивление и емкость конденсаторных батарей;

U_{Sj} – напряжения на полюсах СП.

Для моделирования источника напряжения или накопителя энергии большой емкости, уровень напряжения которого изменяется медленно, значение напряжения U_{Sj} может быть независимым или управляемым по другим алгоритмам, разрабатываемым для конкретных электрических установок.

Схема замещения трансформатора присоединения СТАТКОМ приведена на рисунке 2.4.

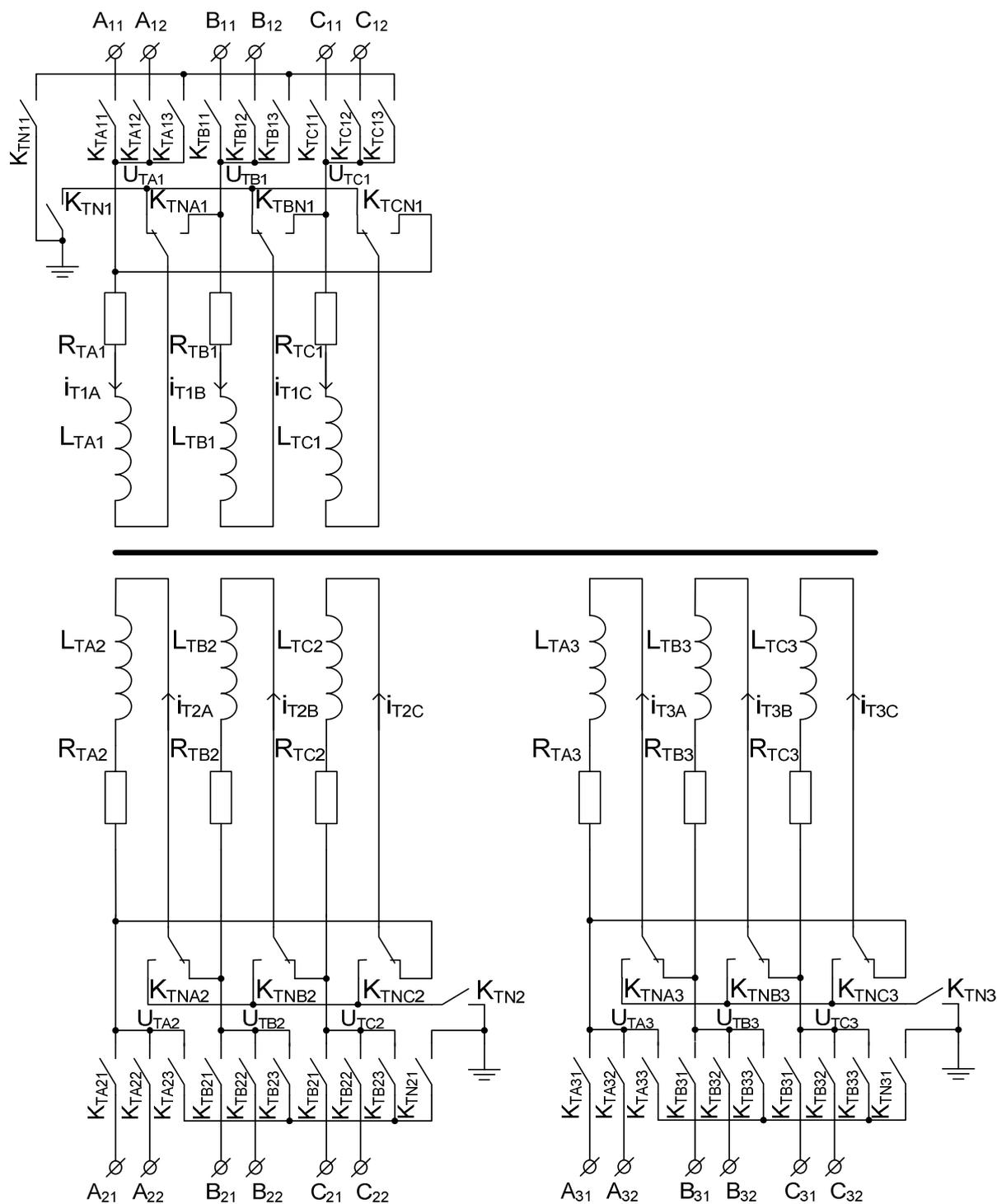


Рис. 2.4. Схема замещения трансформатора присоединения СТАТКОМ

где U_{TAi} , U_{TBi} , U_{TCi} – фазные напряжения i -той обмотки трансформатора;
 L_{TAi} , L_{TBi} и L_{TCi} – индуктивности реакторов i -тых обмоток трансформатора;
 R_{TAi} , R_{TBi} и R_{TCi} – сопротивления реакторов i -тых обмоток трансформатора.

Коммутация ключей K_{TN} позволяет реализовать различные схемы соединения обмоток трансформатора. С учетом возможных вариантов схем

соединения обмоток, всережимная математическая модель трансформатора для фазы A имеет следующий вид идентичный для всех фаз:

$$\begin{cases} \frac{di_{T1A}}{dt} = \frac{1}{L_{T1A}} \left(U_{T1A} - R_{T1A}i_{T1A} - W_{T1A} \frac{d\Phi_{TA}}{dt} \right); \\ \frac{di_{T2A}}{dt} = \frac{1}{L_{T2A}} \left(-U_{T2A} - R_{T2A}i_{T2A} + W_{T2A} \frac{d\Phi_{TA}}{dt} \right); \\ \frac{di_{T3A}}{dt} = \frac{1}{L_{T3A}} \left(-U_{T3A} - R_{T3A}i_{T3A} + W_{T3A} \frac{d\Phi_{TA}}{dt} \right); \\ F_{TA} = W_{T1A}i_{T1A} + W_{T2A}i_{T2A} + W_{T3A}i_{T3A}; \\ \Phi_{TA} = f(F_{TA}); \end{cases} \quad (2.3)$$

В системе уравнений (2.3) использованы следующие обозначения:

U_{TiA} – напряжения на i -тых обмотках трансформатора;

W_{TiA} – число витков i -ой обмотки фазы A ;

Φ_{TA} – магнитный поток в сердечнике трансформатора;

F_{TA} – результирующая магнитодвижущая сила.

Напряжения на i -тых обмотках трансформатора при схеме соединения обмоток звезда равны фазным $U_{TiA} = U_{TAi}$, а треугольник – линейным $U_{TiA} = U_{TAi} - U_{BTi}$. Фазный ток трансформатора при соединении обмоток в звезду равен току обмотки трансформатора $i_{TAi} = i_{TiA}$, а при соединении в треугольник – разности токов двух обмоток $i_{TAi} = i_{TiA} - i_{TiB}$.

Нелинейная взаимосвязь магнитного потока и результирующей магнитодвижущей силы определяется зависимостью магнитной индукции от напряженности магнитного поля и линейными размерами сердечника. Данная зависимость определяется экспериментально и при моделировании трансформаторов используют различные виды ее аппроксимации. Применение получили следующие виды аппроксимации [101]: кусочно-линейная, гиперболическая $\Phi_{TA} = k_1 F_{TA} / (k_2 + k_3 F_{TA})$, с использованием функции арктангенса, экспоненциальная, логарифмическая, полиномиальная, гиперболическим синусом, гиперболическим тангенсом, методом сплайнов, и с использованием рациональных функций. В ГСТ, имеющем цифро-аналоговую структуру, достаточно достоверно можно реализовать КН с помощью кусочно-линейной (рисунок 2.5, а) и гиперболической аппроксимаций (рисунок 2.5, б), остальные либо не обеспечивают

достаточную точность либо в принципе не могут быть реализованы. КН может быть задана таблично по заранее рассчитанным значениям с использованием любой из указанных видов ее аппроксимации. Однако в этом случае невозможность воспроизвести характеристику КН непрерывно, что негативно повлияет на результаты моделирования.

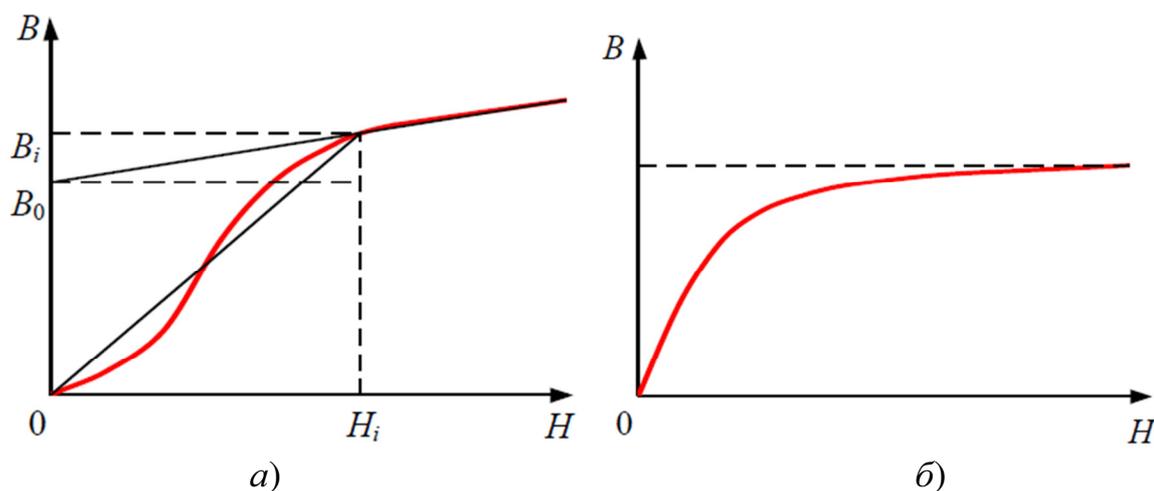


Рис. 2.5. Аппроксимации кривой намагничивания стали

Схема замещения фильтра, представленная на рисунке 2.6, позволяет реализовать различные типы фильтров: полосно-заграждающий фильтр (последовательно соединенные КБ и реактор), фильтр нижних частот (КБ или последовательно соединенный КБ и резистор) и их комбинация, которая позволяет обеспечить максимальное подавление на частоте резонанса и ограниченное подавление частот выше резонансной.

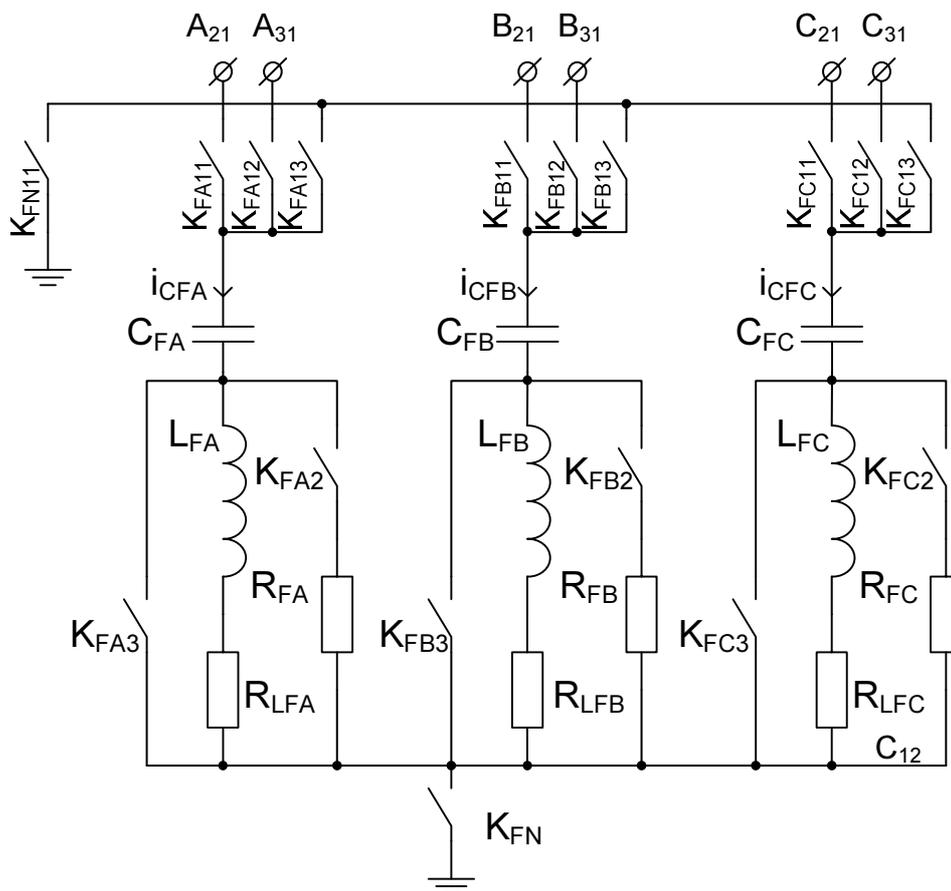


Рис. 2.6. Схема замещения фильтра

где L_{FA}, L_{FB}, L_{FC} – индуктивности реакторов фильтра;

$R_{LFA}, R_{LFB}, R_{LFC}$ – активные сопротивления реакторов фильтра;

C_{FA}, C_{FB}, C_{FC} – емкости конденсаторных батарей фильтра;

R_{FA}, R_{FB}, R_{FC} – активные сопротивления резисторов фильтра.

Процессы в фильтре описаны системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_{CFA}}{dt} = \frac{1}{C_{FA}} i_{CFA}; \\ i_{RFA} = i_{CFA} - i_{LFA}; \\ U_{RFA} = i_{RFA} R_{FA}; \\ \frac{di_{LFA}}{dt} = \frac{1}{L_{FA}} (U_{RFA} - i_{LFA} R_{LFA}); \\ U_{A2} = U_{RFA} + U_{FN} + U_{CFA}, \end{array} \right. \quad (2.4)$$

где i_{LFA} – ток в индуктивности соответствующей фазы фильтра;

i_{RFA} – ток в резисторе соответствующей фазы фильтра;

U_{CFA} , – напряжения на конденсаторах фильтра;

$U_{RFA}, U_{RFB}, U_{RFC}$ – напряжения на резисторах фильтра.

Ток фазы фильтра равен фазному току трансформатора при его присоединении к отдельной обмотке или разности токов трансформатора и реактора СТАТКОМ $i_{CFA} = i_{TA2} - i_{RA}$ при присоединении к одним и тем же выводам трансформатора вместе с реакторами СТАТКОМ.

Разработанная совокупная трехфазная математическая модель позволяет воспроизводить весь спектр процессов функционирования СТАТКОМ с учетом различных топологий СП.

Функциональные схемы, реализующие математические модели силового оборудования СТАТКОМ, которые представлены в системе относительные единиц [102], приведены на рисунках 2.7, 2.8.

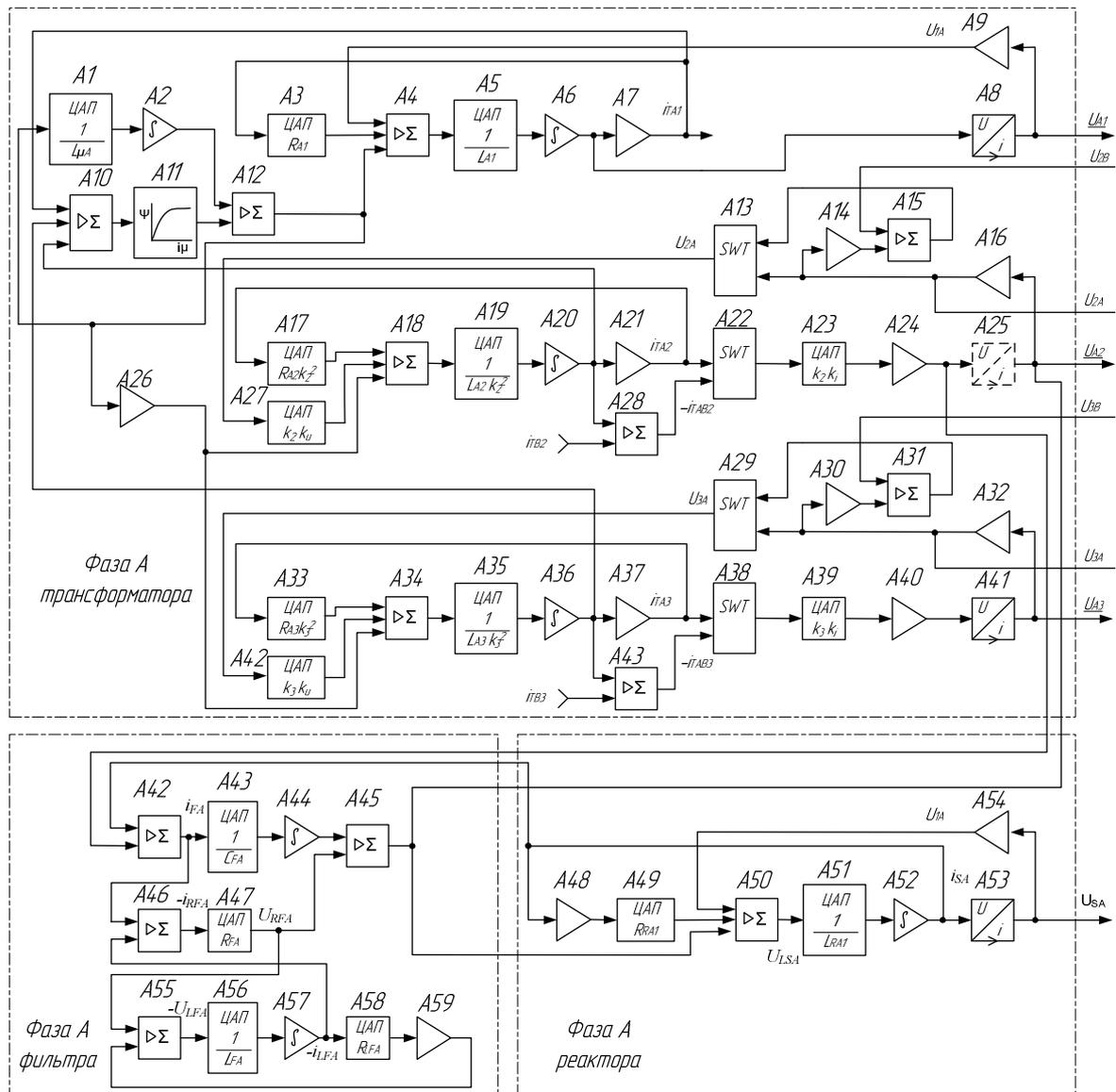


Рис. 2.7. Функциональная схема реализации математических моделей трансформатора, фильтра и реактора фазы А СТАТКОМ

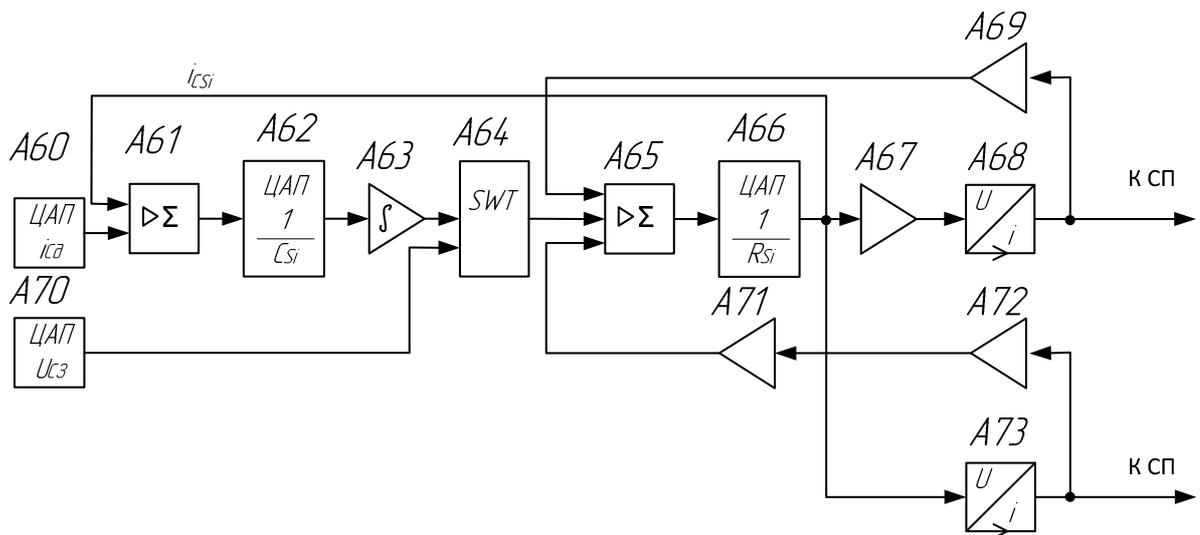


Рис. 2.8. Функциональная схема реализации математической модели цепи выпрямленного напряжения СТАТКОМ

На рисунках приняты обозначения:

$k_{Ti} = \frac{W_{1A} W_{iA0}}{W_{iA} W_{1A0}}$ – коэффициент трансформации относительно нулевой отпайки;

W_{iA0} – число витков i -ой обмотки фазы А трансформатора на нулевой отпайке;

L_{Ai}, R_{Ai} – индуктивности и сопротивления i -ой, приведенные к первичной обмотке на нулевой отпайке трансформатора;

k_u, k_i – коэффициенты изменения базисов по напряжению и по току;

$i_{сд}$ – добавочный ток КБ для решения исследовательских задач;

$U_{сз}$ – задание напряжения при моделировании источника накопителя энергии.

При составлении функциональных схем реализации математических моделей реактора, ЦВН и фильтра не требуется дополнительные преобразования при переводе из системы абсолютных в систему относительных величин. Математическое описание процессов в трансформаторе преобразовано для учета изменения коэффициента трансформации и имеет вид (2.5) полностью соответствующий (2.3).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{1Ao.e.}}{dt} = \frac{1}{L_{1Ao.e.}} \left(+U_{1Ao.e.} - R_{1Ao.e.} \cdot i_{1Ao.e.} - \frac{d\Psi_{A1o.e.}}{dt} \right); \\ \frac{di'_{2Ao.e.}}{dt} = \frac{1}{L'_{2Ao.e.}} \left(-U'_{2Ao.e.} - R'_{2Ao.e.} \cdot i'_{2Ao.e.} + \frac{d\Psi_{A1o.e.}}{dt} \right); \\ \frac{di'_{3Ao.e.}}{dt} = \frac{1}{L'_{3Ao.e.}} \left(-U'_{3Ao.e.} - R'_{3Ao.e.} \cdot i'_{3Ao.e.} + \frac{d\Psi_{A1o.e.}}{dt} \right); \\ i_{\mu Ao.e.} = i_{1Ao.e.} - i'_{2Ao.e.} - i'_{3Ao.e.}; \\ \Psi_{A1} = f \left(\frac{W_{1A}^2 i_{1A6}}{U_{1A6}} i_{\mu Ao.e.} \right), \end{array} \right. \quad (2.5)$$

где $\Psi_{A1} = W_{1A} \Phi_A$ – потокосцепление первичной обмотки трансформатора;

$i_{\mu A} = \frac{F_A}{W_{1A}}$ – ток намагничивания фазы A трансформатора.

Разработанные на основе математического описания функциональные схемы подтверждают возможность реализации синтезированной модели силового оборудования СТАТКОМ цифро-аналоговыми средствами гибридных сопроцессоров, поскольку анализ функциональных схем не выявил наличия положительных обратных связей и наличия идеальных дифференцирующих цепей ухудшающих устойчивость работы ГПС.

2.2 Система автоматического управления СТАТКОМ

Системы управления СТАТКОМ и других устройств на базе СП обычно реализованы во вращающейся dq -системе координат [48, 49], что позволяет независимо и в широком диапазоне управлять активной и реактивной составляющими мощности, потребляемыми или генерируемыми в сеть. Для взаимодействия САУ, построенной в двухфазной вращающейся системе координат, с трехфазным оборудованием применяются преобразователи координат. Расчет необходимых для САУ параметров амплитуды u_d и угла θ вектора напряжения относительно фазы A, проекций вектора тока на оси d и q и нулевых последовательностей напряжения и тока u_0, i_0 , осуществляется согласно системе уравнений (2.6). Мгновенные значения полной мощности по трем фазам s и ее активная p и реактивная q составляющих определяются по выражениям 2.7. Для формирования

управляющих воздействия на СП производится обратное преобразование координат по уравнениям системы (2.8).

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\alpha} = \frac{2}{3} \left(u_A - \frac{1}{2} u_B - \frac{1}{2} u_C \right); \\ u_{\beta} = \frac{(u_B - u_C)}{\sqrt{3}}; \\ u_1 = u_d = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}; \\ u_0 = \frac{1}{3} (u_A + u_B + u_C); \\ \sin(\theta) = \frac{u_{\beta}}{u_d}; \\ \cos(\theta) = \frac{u_{\alpha}}{u_d}; \\ i_{\alpha} = \frac{2}{3} \left(i_A - \frac{1}{2} i_B - \frac{1}{2} i_C \right); \\ i_{\beta} = \frac{(i_B - i_C)}{\sqrt{3}}; \\ i_1 = \sqrt{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2}; \\ i_d = i_{\alpha} \cos(\theta) + i_{\beta} \sin(\theta); \\ i_q = i_{\alpha} \sin(\theta) + i_{\beta} \cos(\theta); \\ i_0 = \frac{1}{3} (i_A + i_B + i_C). \end{array} \right. \quad (2.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p = u_d i_d + u_q i_q \\ q = u_d i_q + u_q i_d \\ s = u_1 i_1; \end{array} \right. \quad (2.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\alpha} = U_d \cos(\theta) - U_q \sin(\theta); \\ U_{\beta} = U_d \sin(\theta) + U_q \cos(\theta); \\ U_A = U_{\alpha}; \\ U_B = -\frac{1}{2} U_{\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\beta}; \\ U_C = -\frac{1}{2} U_{\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\beta}. \end{array} \right. \quad (2.8)$$

В системах уравнений приняты обозначения:

$u_A, u_B, u_C, i_A, i_B, i_C$ – мгновенные значения напряжений и токов;

$u_{\alpha}, u_{\beta}, i_{\alpha}, i_{\beta}$ – проекции векторов тока и напряжения на оси двухфазной неподвижной системы координат;

u_d, u_q, i_d, i_q – проекции векторов тока и напряжения на оси двухфазной вращающейся системы координат.

Анализ разнообразия систем управления [72–94] выявил базовые алгоритмы, используемые практически во всех рассмотренных САУ СТАТКОМ. В общем случае они содержат контур регулирования выпрямленного напряжения, контур регулирования реактивной мощности и контур регулирования напряжения в точке присоединения. Обычно регуляторы в контурах регулирования имеют пропорционально-интегральную структуру.

Обобщенная структурная схема САУ, в которой реализованы базовые алгоритмы, приведена на рисунке 2.9 [72–87].

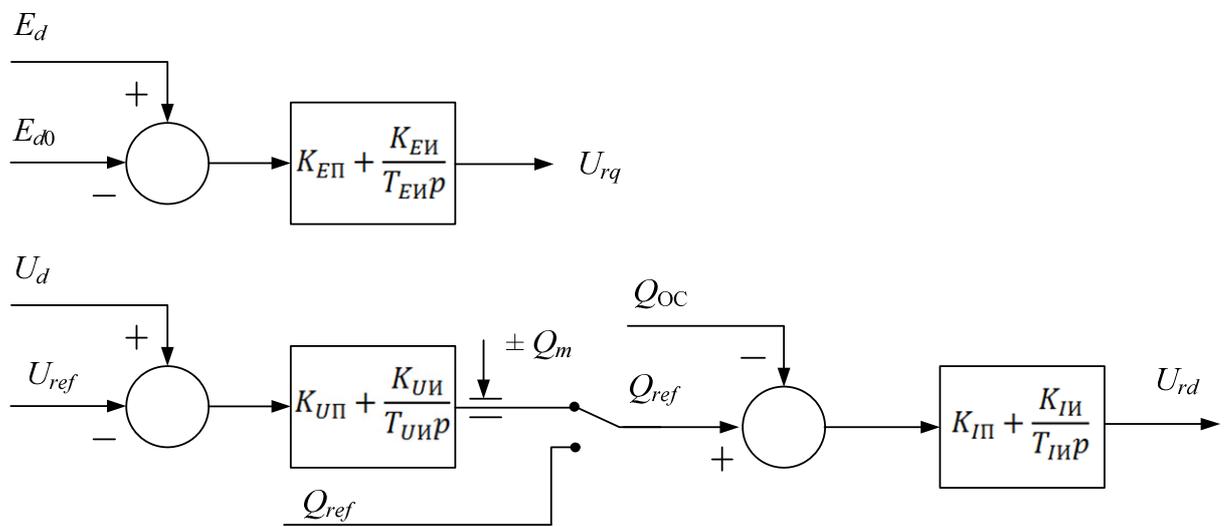


Рис. 2.8. Базовая структурная схема САУ СТАТКОМ9

На рисунке приняты следующие обозначения:

E_d, E_{d0} – измененное выпрямленное напряжения и задающая его уставка;

U_d, U_{ref} – измененное напряжение в точке присоединения СТАТКОМ и задающая его уставка;

Q_{oc}, Q_{ref}, Q_m – рассчитанная по (2.7) реактивная мощность СТАТКОМ, задающая ее уставка и уровень ограничения в соответствии с максимально допустимым значением;

U_{rd}, U_{rq} – значения проекций вектора желаемого трехфазного напряжения СП на оси вращающейся dq -системы координат.

Прочие надстройки САУ, контура регулирования нулевой и обратной последовательностей, алгоритмы фильтрации высших гармоник следует разрабатывать для каждого конкретного случая и не включать в базовую структуру САУ.

2.3 Выводы

1. Разработанная универсальная трехфазная всережимная математическая модель в совокупности с возможностью моделирования с помощью интегральных микроэлектронных цифруправляемых ПП ключей на модельном физическом уровне любых топологий СП позволяют непрерывно и бездекомпозиционно воспроизводить в реальном времени и на неограниченном интервале реальный спектр процессов функционирования СТАТКОМ.

2. Структурная и созданные на основе совокупной математической модели функциональные схемы подтверждают возможность реализации модели СТАТКОМ программно-техническими средствами всережимного моделирования в реальном времени, для моделирования функционирования СТАТКОМ автономно и в составе модели ЭЭС.

3. Синтезированные математические модели силового оборудования и САУ СТАТКОМ могут служить математической основой для создания программно-технических средств всережимного моделирования в реальном времени СТАТКОМ.

3 РЕАЛИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО ПРОЦЕССОРА ДЛЯ ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ СТАТКОМ

Согласно разработанной и рассмотренной в предыдущем разделе структурной схеме, гибридный процессор СТАТКОМ содержит совокупность взаимодействующих гибридных сопроцессоров трансформатора, реактора, фильтра, цепи выпрямленного напряжения и функционирующий на физическом уровне СП на базе ЦУАК. Управляемые в реальном времени блоком микропроцессоров (БМ), реализующих в том числе алгоритмы САУ, сопроцессоры обеспечивают непрерывное моделирование функционирования СТАТКОМ. Для адекватного моделирования всевозможных продольных и поперечных коммутаций в узлах физических объединений использованы ЦУАК.

Функциональные схемы, разработанные на основе математического описания силового оборудования, полностью определяют возможности проектирования в соответствии с ними принципиальных схем для практической реализации указанных сопроцессоров, за исключением схемы воспроизведения кривой намагничивания $\Psi=f(i_\mu)$.

Точность моделирования для заданных параметров силового оборудования и САУ СТАТКОМ, полностью определяется инструментальной погрешностью при методически точном решении в гибридных сопроцессорах, и адекватностью средств реализации цифровой САУ. Поэтому, во-первых, значимой является предварительная проверка обеспечения инструментальной точности в гарантируемых диапазонах задаваемых параметров по схеме замещения и частот процессов, протекающих в оборудовании. Во-вторых, значима оценка динамических свойств и вычислительных ресурсов БМ позволяющих адекватно воспроизводить действие станций управления СТАТКОМ с различными

несущими частотами коммутации ПП вентилей СП и различной сложностью алгоритмов управления.

В качестве предварительной проверки характеристик гибридного процессора, применено компьютерное моделирование, учитывающее разработанные принципиальные схемы, свойства, характеристики и паразитные параметры применяемой интегральной микросхеменной элементной базы.

Для оценки адекватности средств реализации цифровой САУ служат минимальные показатели временных задержек в каналах измерения и управления, времена выполнения основных алгоритмов САУ, запас вычислительных ресурсов, обеспечивающий возможность усложнения реализованных и добавления новых контуров регулирования в соответствии с САУ конкретной установки СТАТКОМ. Оценка характеристик разработанного БМ проведена с учетом его структуры, интерфейсов взаимодействия и выполнения дополнительных программных функций: управления параметрами модели силового оборудования, системы управления, состояниями ЦУАК СП, продольной и поперечной коммутации, получения и преобразования данных АЦП в соответствии с информационной моделью представления первичных процессов в оборудовании и других функций, обеспечивающих управление и наблюдения за процессом моделирования.

3.1 Реализация кривой намагничивания трансформатора в гибридном процессоре СТАТКОМ

Поскольку главной целью учета кривой намагничивания (КН) при моделировании трансформатора является достоверное воспроизведение гармонического спектра, возникающего в режимах насыщения магнитопровода, и его влияния на процессы в трансформаторе в целом, наиболее обоснованным оказывается непрерывное воспроизведение КН.

Решение данной задачи с приемлемой точностью, осуществляемое в представленной на рисунке 2.7 схеме ГСТ с помощью функционального преобразователя А11, обеспечивается применением соответствующей аппроксимирующей функции на основе функции № 6 таблицы 2.1. Для реализации симметричной относительно начала координат функции значение переменной тока намагничивания взято по модулю, а для реализации возможности задания наклона кривой намагничивания на участке насыщения в функцию введена аддитивная составляющая пропорциональная току намагничивания.

$$\Psi = \frac{k_1 i_\mu}{k_2 + k_3 |i_\mu|} + k_{\text{НАС}} i_\mu \quad (3.1)$$

Указанная аппроксимация реализована с помощью адаптированной для (3.1) схемы [103] на базе интегрального перемножителя непрерывных сигналов DA1 (рисунок 3.1).

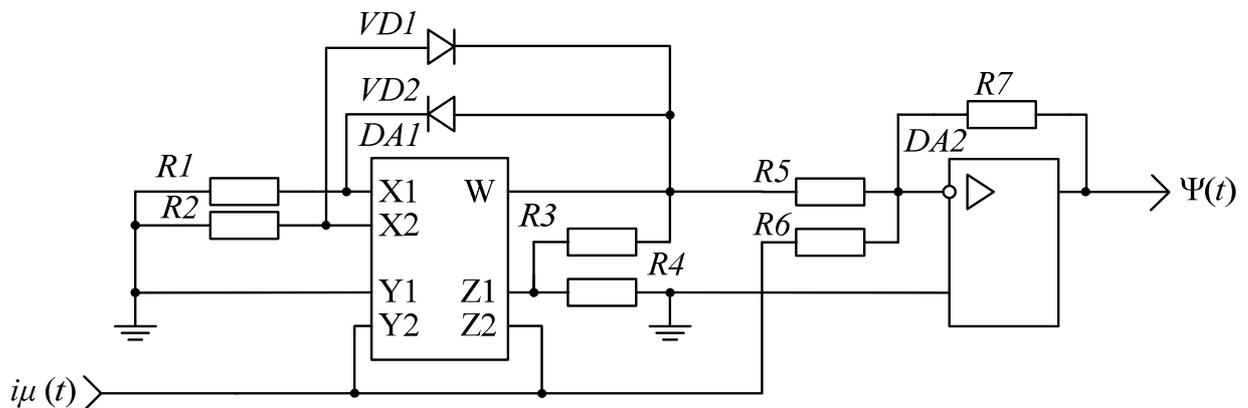


Рис. 3.1. Функциональный преобразователь для непрерывного воспроизведения кривой намагничивания

С учетом передаточной функции используемого интегрального перемножителя DA1 [103].

$$W = A \left(\frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{SF} - (Z_1 - Z_2) \right), \quad (3.2)$$

где $A = 10^5$, $SF = 10$ [104], представленная на рисунке 3.1 схема функционального преобразователя обеспечивает непрерывное широкополосное воспроизведение нелинейной зависимости

$$\Psi(t) = - \frac{\frac{R_7}{R_5} i_\mu(t)}{\frac{1}{A} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \frac{i_\mu(t) \left(\frac{R_1}{R_1 + R_{VD1}} - \frac{R_2}{R_2 + R_{VD2}} \right)}{SF}} - \frac{R_7}{R_6} i_\mu(t) \quad (3.3)$$

Для воспроизведения заданной таблично (таблица 3.1) [104] зависимости электромагнитной индукции и напряженности магнитного поля $B(H)$ рассчитаны параметры (таблице 3.2) элементов принципиальной схемы с учетом ограничений по выходной нагрузке интегрального перемножителя.

Таблица 3.1. Зависимость $B(H)$

B , Тл	0	0,2	0,4	0,8	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3
H , А/м	0	90	120	170	220	260	320	420	650	1050	2000	4000	7500	10500	18000	29500	47000	100000

Таблица 3.2. Параметры элементов схемы реализации КН

Параметр	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
Сопrotивление, кОм	3	3	500	1	47	1150	47

Аналитическая расчетная для функционального преобразователя, на основе передаточной функции (3.3) характеристика приведена на рисунке 3.2 совместно КН, построенной по данным таблицы 3.1.

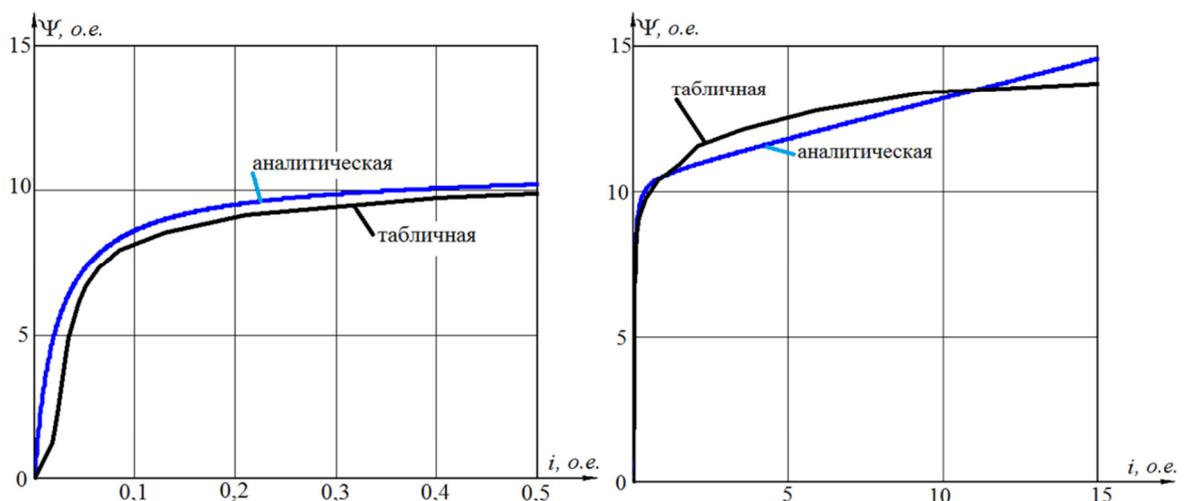


Рис. 3.2. Статические характеристики функционального преобразователя, воспроизводящего заданную таблично КН

Схема достаточно точно воспроизводит форму кривой намагничивания, на начальном участке и на участке насыщения. Максимальное значение сигнала на выходе $DA1$ управляемо общим коэффициентом передачи схемы и соотношением сопротивлений R_7 и R_5 , наклон в области насыщения – соотношением R_7 и R_6 , а наклон на начальном участке – соотношением сопротивлений R_3 и R_4 (рисунок 3.1).

Анализ аналитической характеристики и схемы показал, что коэффициент передачи на начальном участке характеристики может составлять 500, а на участке насыщения 0,3. Такие коэффициенты передачи вполне реализуемы на существующей элементной базе.

3.2 Компьютерное моделирование и исследование основных фрагментов сопроцессоров гибридного процессора СТАТКОМ

Целью компьютерного моделирования и исследований основных фрагментов сопроцессоров гибридного процессора СТАТКОМ является предварительное тестирование различных функциональных и принципиальных схем ГПС и определение требований к метрологическим, в особенности частотным, характеристикам элементной базы и конструированию печатной платы разрабатываемого ГПС. На компьютерных моделях отработаны различные нормальные и аномальные режимы работы оборудования СТАТКОМ, для различных структур и параметров схемы замещения. Исследование частотных свойств сопроцессоров позволяют определить резонансные частоты, вызванные наличием паразитных параметров элементов схемы, а также оценить диапазон частот, внутри которой обеспечивается приемлемая инструментальная погрешность моделирования.

Анализ существующих программ моделирования электронных схем выявил следующие:

1. Существует несколько программ для моделирования электронных схем (PSpice, Cadence OrCAD, Altium Designer, National Instruments Multisim 11, Designsoft Tina, TopSpice, LTSpice), однако их обзор показал наличие необходимых моделей компонентов только в Multisim 11.

2. Модели компонентов, имеющихся в схеме, представлены на сайте Analog Devices только в формате (*.CIR). Формат *.CIR представляет из себя математическое описание модели компонента и не содержит в себе графического отображения, следовательно, при его использовании в любом случае необходимо создавать под него компонент-контейнер. Большинство других производителей тоже предоставляют модели в этом формате.

3. Применение встроенного конвертора моделей в различные форматы не позволило передать модель преобразователя напряжение-ток в другие программы, а создание модели компонентов «вручную» не гарантирует адекватность полученных результатов.

Исходя из этого для исследования электронных схем, решено остановиться на программе Multisim 11.

Поскольку модели компонентов учитывают паразитные параметры, то при моделировании появляются постоянные времени малого порядка, что требует уменьшения шага интегрирования и как следствие к увеличению времени моделирования. В подобных условиях целесообразно осуществлять моделирование не всей схемы, а отдельных ее фрагментов. Фрагментация схемы производится по принципу максимальной взаимосвязи элементов, а также по единому структурному назначению и функциональным связям. Если схема фрагмента является сложной и ее моделирование занимает продолжительное время, то она может быть упрощена путем удаления одинаковых цепей, например можно осуществлять моделирование только одной фазы или удалить из схемы модели одну из обмоток трансформатора, при этом изменения не окажут значительного влияния на результаты моделирования.

3.2.1 Компьютерная модель гибридного сопроцессора трансформатора

Перед исследованием работы схемы сопроцессора трансформатора необходимо проверить работу схемы реализующей КН трансформатора (рисунок 3.3).

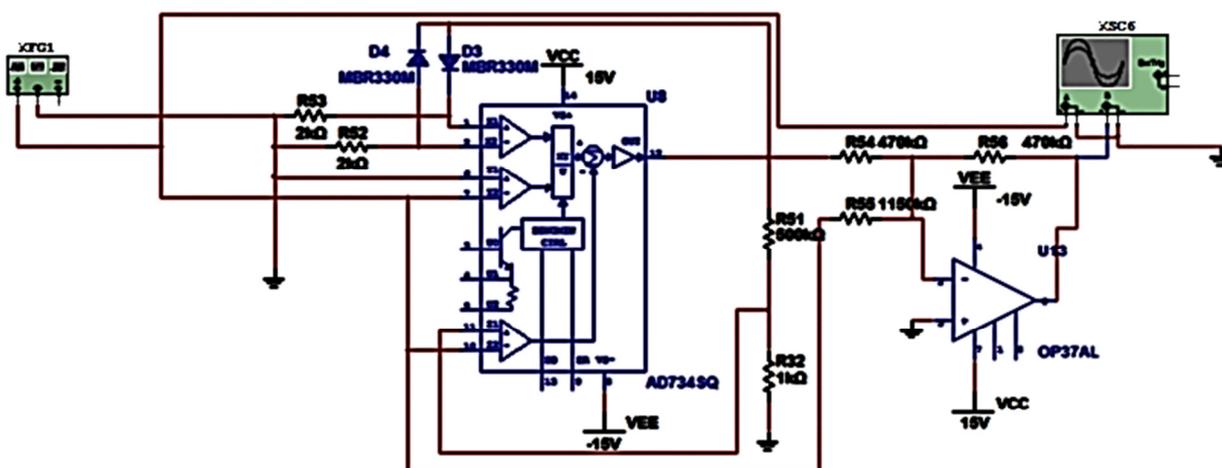


Рис. 3.3. Компьютерная модель функционального преобразователя, реализующего воспроизведение кривой намагничивания

В результате моделирования получены характеристики (рис. 3.4), совпадающие с полученными ранее аналитическими, следовательно модель элемента, реализующего КН, работает правильно. Для проверки адекватности разработанной модели трансформатора проведено моделирование его работы в режиме холостого хода и номинальной нагрузки при пуске и в установившемся режиме. Компьютерная модель фрагмента схемы ГСТ, реализующая модель однофазного двухобмоточного трансформатора, представлена на рисунке 3.5.

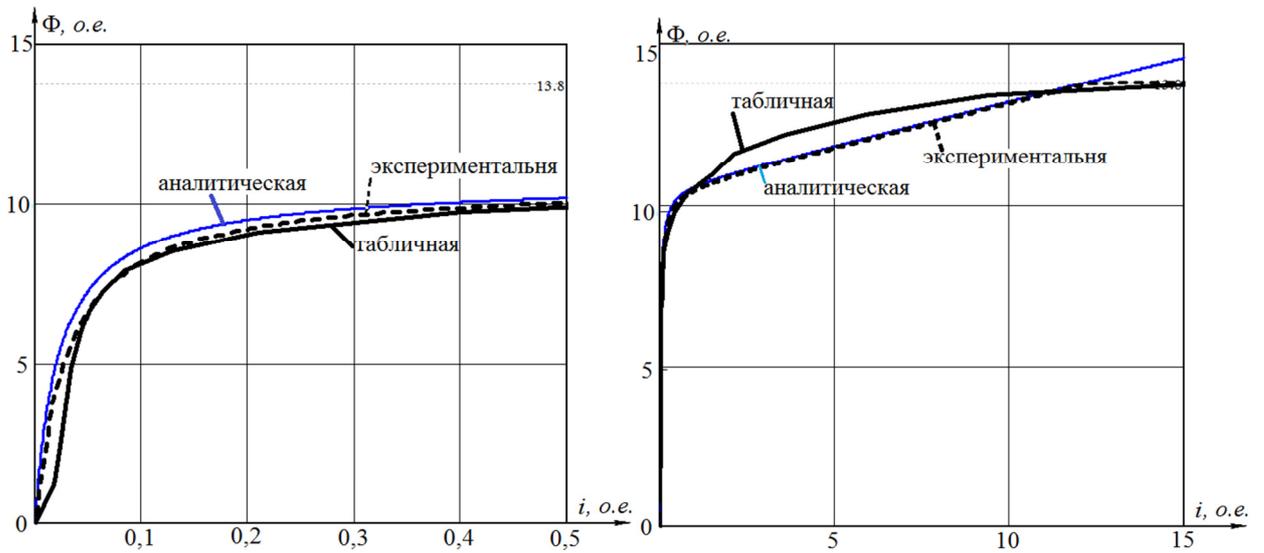


Рис. 3.4. Статические характеристики функционального преобразователя, воспроизводящего заданную таблично КН

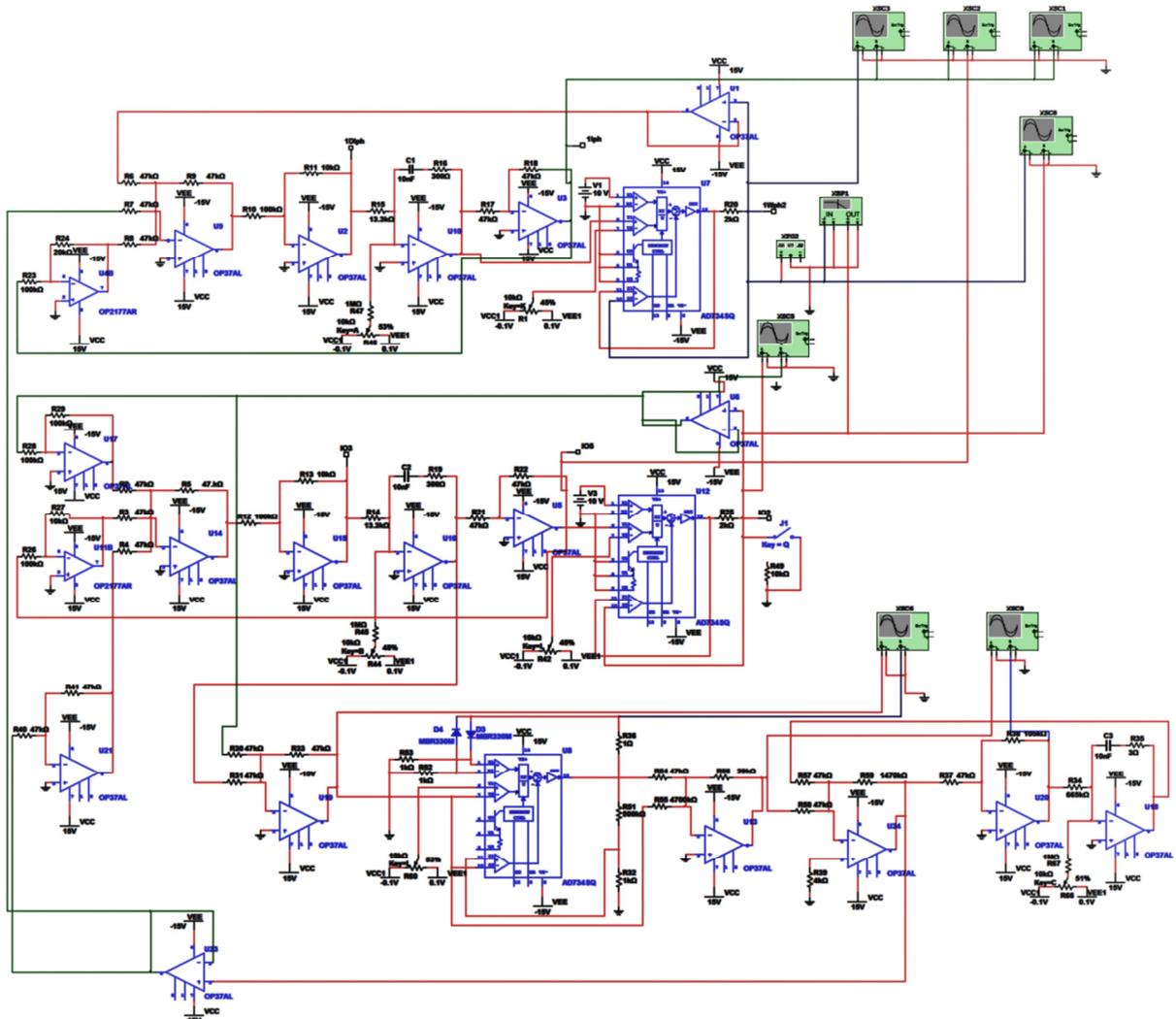


Рис. 3.5. Компьютерная модель однофазного двухобмоточного трансформатора

При включении трансформатора в обмотке, к которой подводится напряжение, возникают броски тока, связанные с насыщением магнитной системы трансформатора. При включении на холостой ход, амплитуда тока в зависимости от типа трансформатора в 3–5 раз превышать его номинальное амплитудное значение. Аналитически рассчитанный переходный процесс тока приведен на рисунке 3.6 [106]. В установившемся режиме осциллограммы напряжения, тока и потока имеют вид показанный на рисунке 3.7 [105].

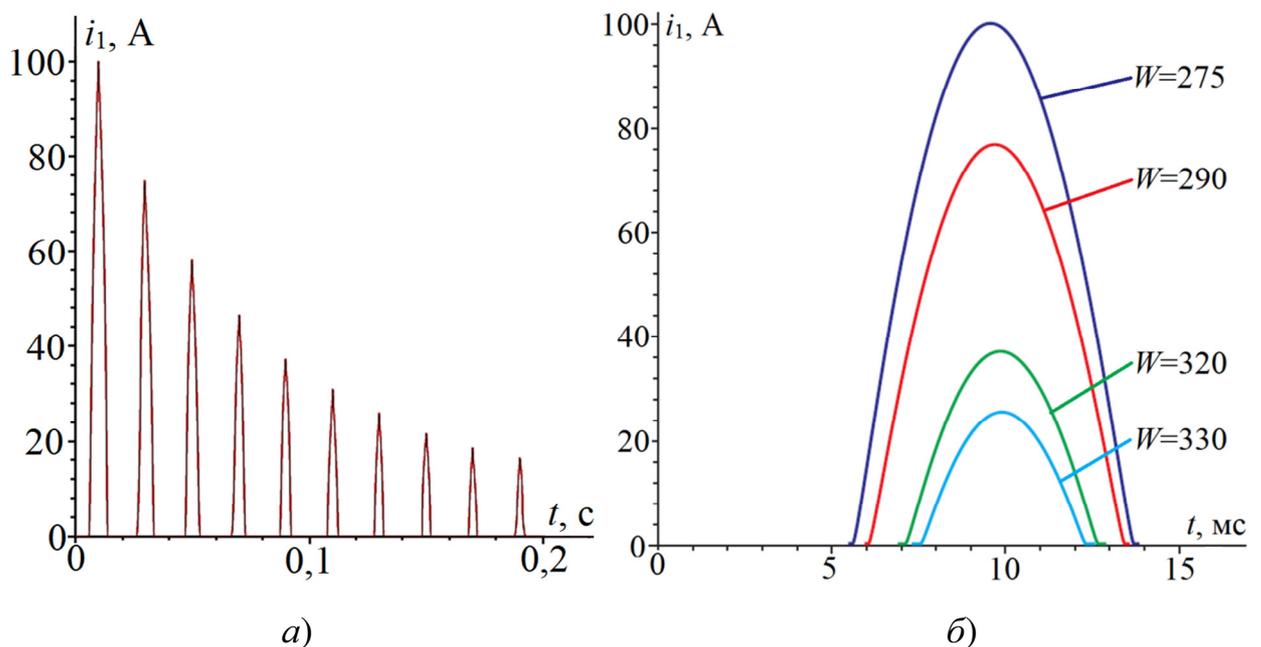


Рис. 3.6. осциллограммы тока первичной обмотки трансформатора при включении на холостом ходу

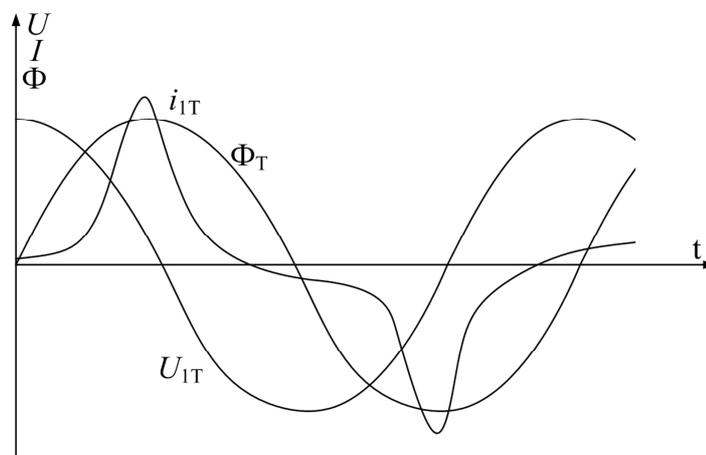


Рис. 3.7. Осциллограммы фазного тока, напряжения и магнитного потока трансформатора в установившемся режиме

При моделировании фрагмента схемы сопроцессора трансформатора, к входу модели первичной обмотки подключался однофазный идеальный источник напряжения с частотой 50 Гц. Осциллограммы, полученные в результате моделирования включения трансформатора на ХХ, представлены на рисунках 3.8–3.11.

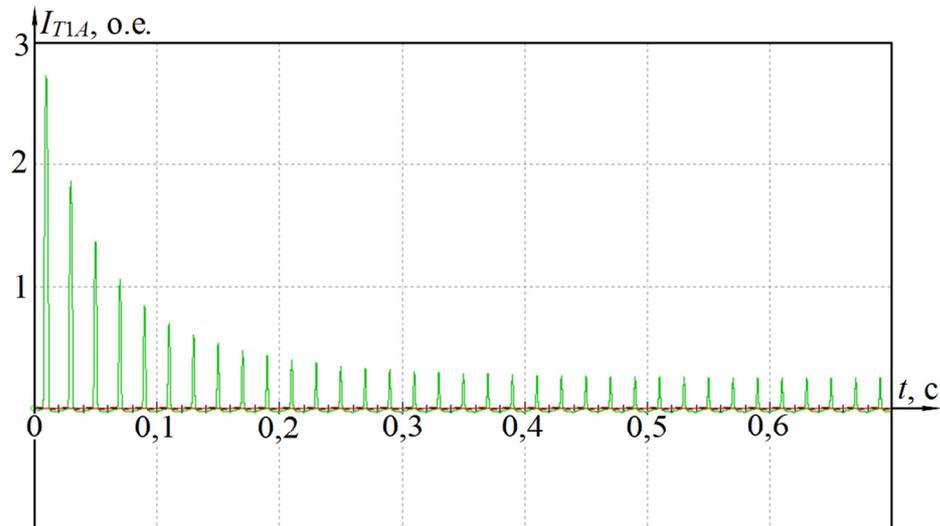


Рис. 3.8. Осциллограмма тока модели первичной обмотки трансформатора при включении на ХХ

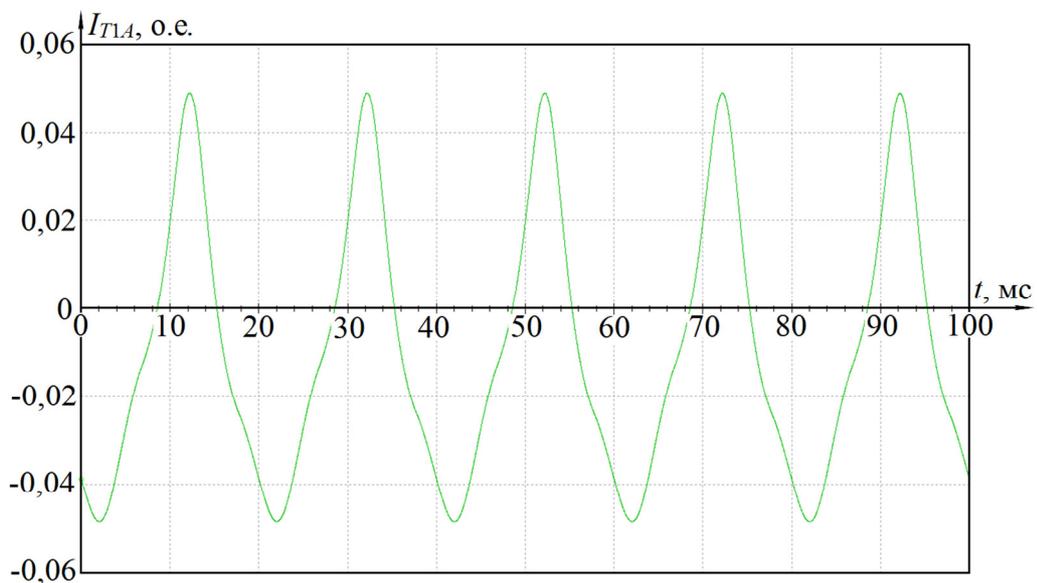


Рис. 3.9. Осциллограмма тока модели первичной обмотки трансформатора при работе на ХХ

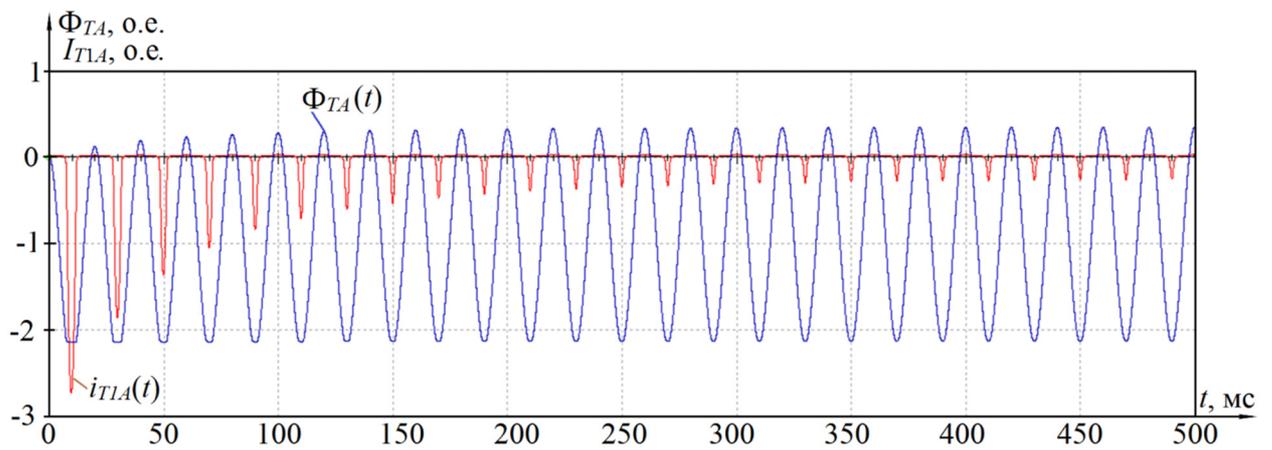


Рис. 3.10. Осциллограммы тока намагничивания и потока модели трансформатора при включении на XX

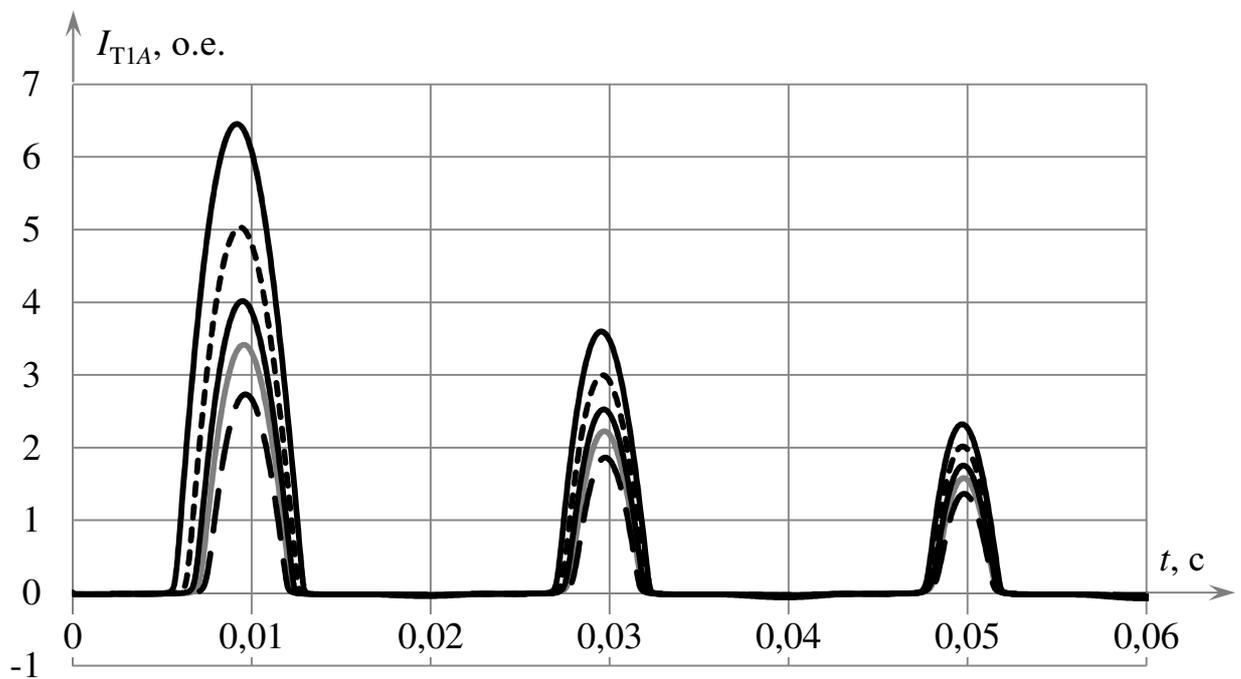


Рис. 3.11. Осциллограмма тока модели первичной обмотки трансформатора при включении на XX

Характеристики трансформатора при включении на XX могут быть заданы параметрами схемы сопроцессора в широких пределах (рисунок 3.11).

Результаты моделирования фрагмента сопроцессора трансформатора в режиме номинальной нагрузки приведены на рисунках 3.12, 3.13.

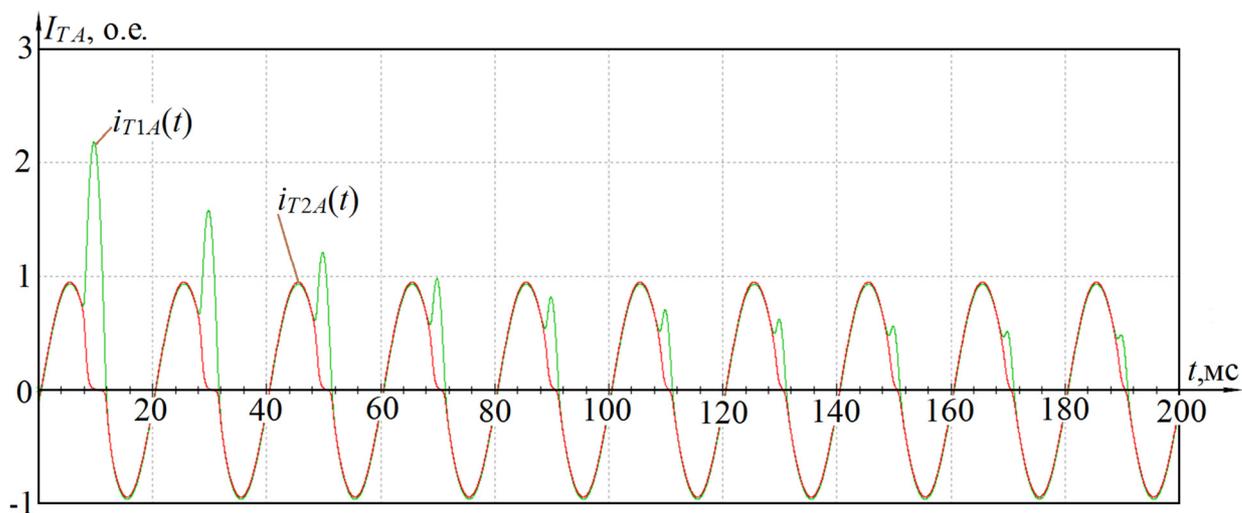


Рис. 3.12. Осциллограммы токов первичной и вторичной обмоток модели трансформатора при пуске с номинальной нагрузкой

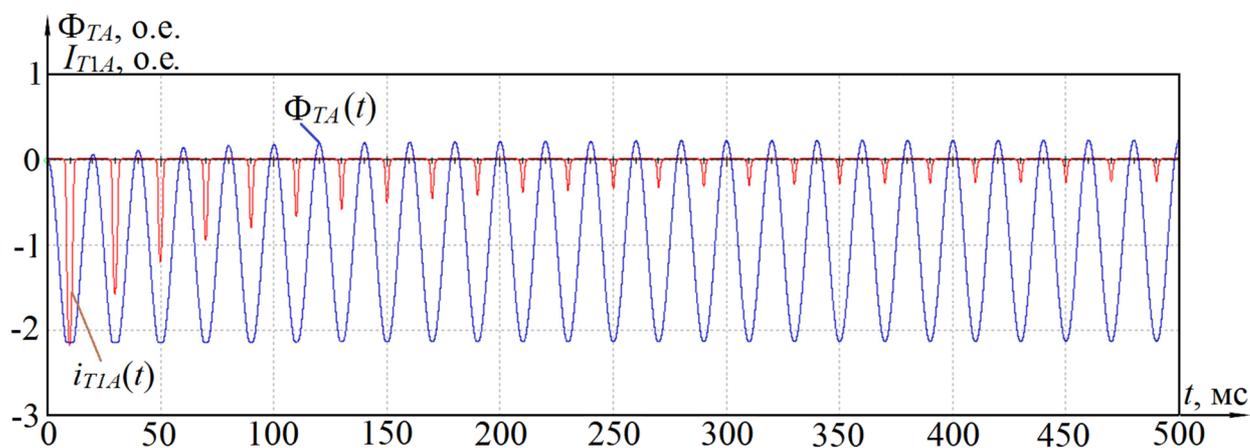


Рис. 3.13. Осциллограммы тока намагничивания и потока модели трансформатора при пуске с номинальной нагрузкой

Результаты моделирования фрагмента сопроцессора трансформатора подтверждают адекватность разработанной модели и схемы ее аппаратной реализации.

3.2.2 Компьютерная модель гибридного сопроцессора реактора

На рисунке 3.14 представлена компьютерная модель схемы сопроцессора реактора для одной фазы, соответствующая функциональной схеме (рисунок 2.7).

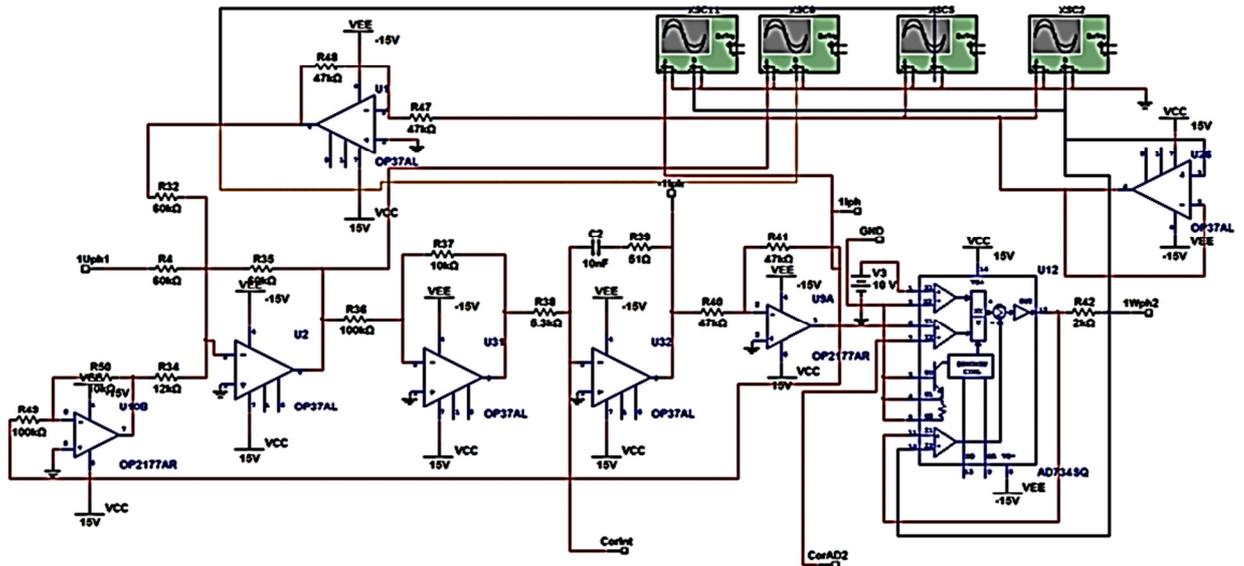


Рис. 3.14. Компьютерная модель сопроцессора реактора

При подаче на вход синусоидального напряжения получаем синусоидальный сигнал тока, сдвинутый приблизительно на 90° (рис. 3.15).

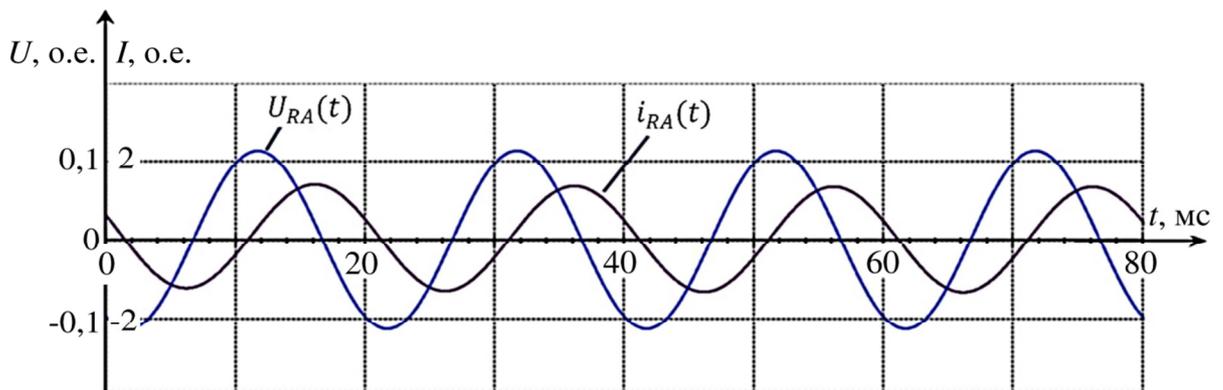


Рис. 3.15. Осциллограммы фазных напряжения и тока модели реактора

Частотные свойства схемы ГСР иллюстрируют логарифмические амплитудно-частотные (ЛАЧХ) и фазо-частотные характеристики (ЛФЧХ) (рисунки 3.16, 3.17), снятые при различных параметрах модельных индуктивностей L' и сопротивлений R' реактора. Для оценки диапазона возможных параметров силового оборудования, значения индуктивности приведены в относительных и в абсолютных величинах.

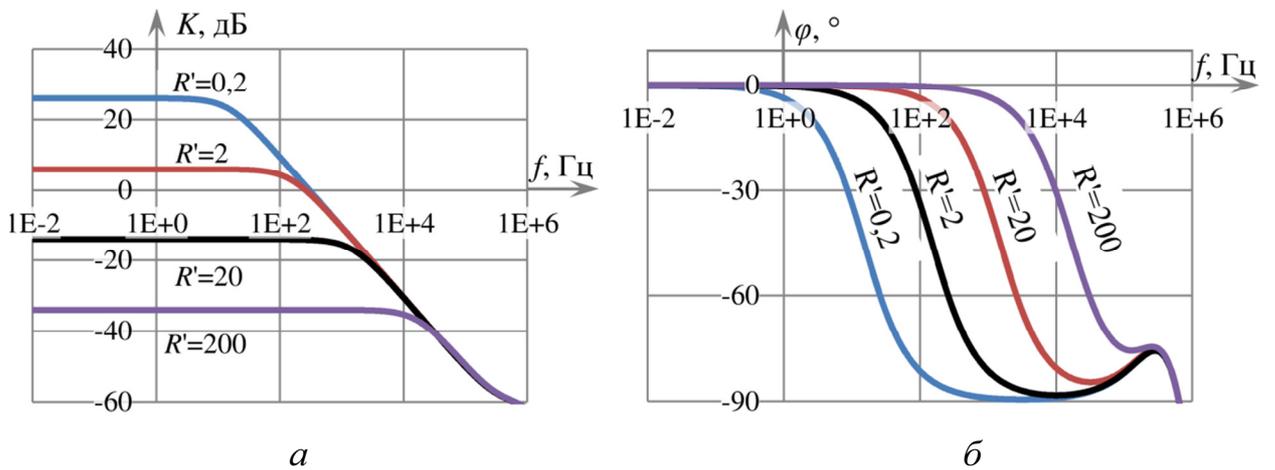


Рис. 3.16. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) сопроцессора реактора при изменении активного сопротивления

Характеристики (рис. 3.16) сняты для индуктивности 3,123 мГн ($5,3 \cdot 10^{-4}$ о.е.) при различных активных сопротивлениях реактора. Частота среза ЛАЧХ совпадает с расчетной, приведенной к модельной величине, и составляет 300 Гц. Подъем ЛФЧХ на частотах выше 10 кГц обусловлен частотными свойствами применяемой интегральной микроселектронной элементной базы.

Таблица 3.3. Зависимость коэффициента передачи на нулевой частоте от сопротивления реактора

Сопротивление модельное R' , о.е.	0,2	2	20	200
Сопротивление реактора, Ом	1,18	11,8	118	1180
Коэффициент передачи на нулевой частоте, дБ	26,02	6,02	-13,98	-33,98

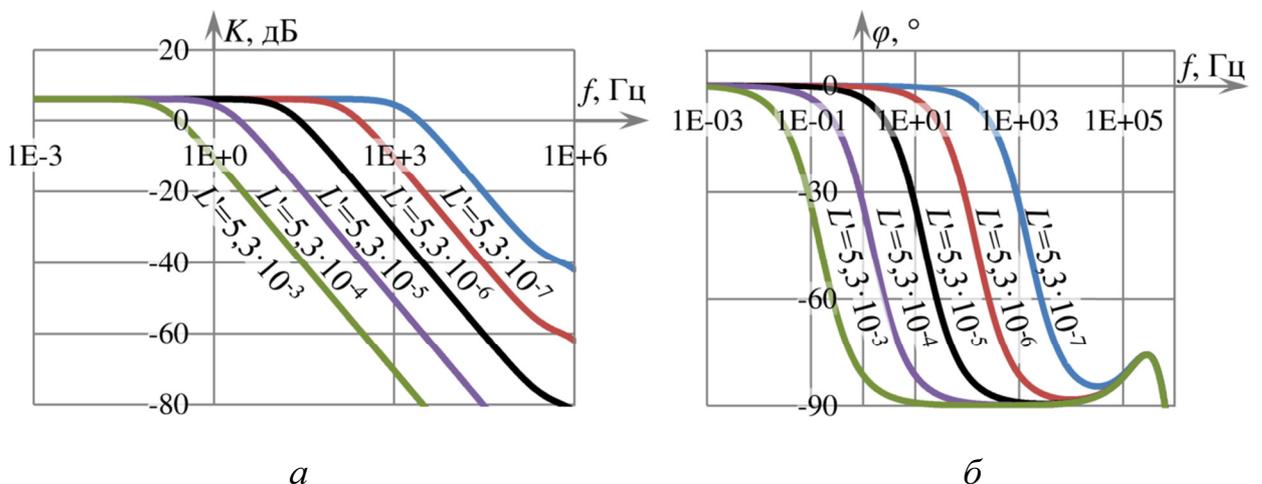


Рис. 3.17. АЧХ (а) и ФЧХ (б) сопроцессора реактора при изменении индуктивности

Характеристики (рис. 3.17) сняты для сопротивления 11,8 Ом (2 о.е.) при различных индуктивностях реактора. Коэффициент передачи на нулевой частоте равен 6,02 дБ и совпадает с расчетным значением.

Таблица 3.4. Зависимость частоты среза АЧХ от индуктивности

Индуктивность модельная L' , о.е.	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$
Индуктивность реактора, мГн	31,23	3,123	0,3123	0,0312	0,0031
Частота среза, Гц	0,259	2,59	25,9	259	2590

Из характеристик (рисунки 3.10, 3.11) и таблиц 3.3 и 3.4 можно определить, что частотный диапазон адекватного воспроизведения процессов в реакторе составляет приблизительно 10 кГц, что соответствует поставленным требованиям.

3.2.3 Компьютерная модель статического преобразователя и гибридного сопроцессора реактора

На рисунке 3.18 приведена компьютерная модель схемы ГСР и СП с двухуровневой топологией для исследования динамических характеристик совместной работы функциональных блоков.

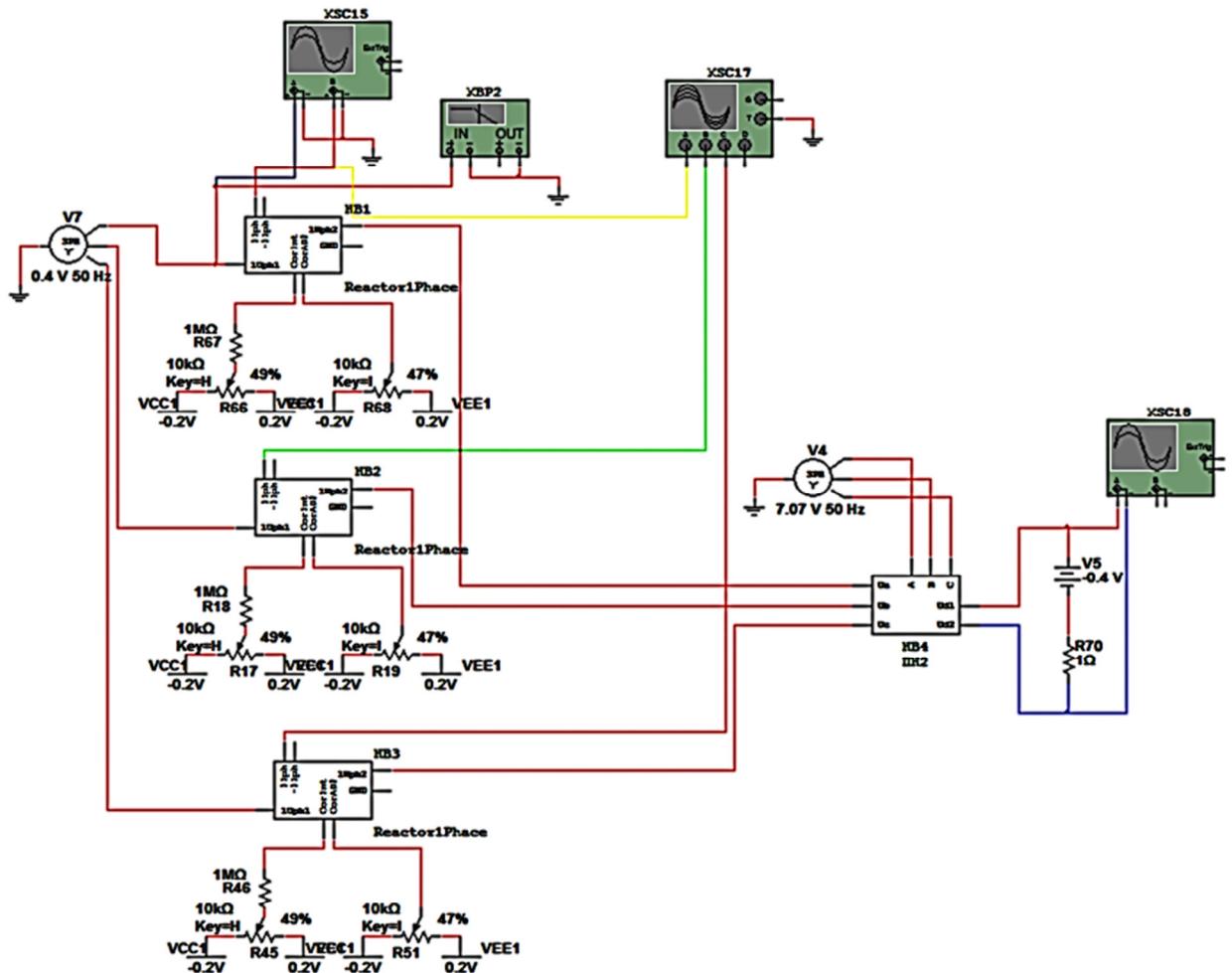


Рис. 3.18. Компьютерная модель сопроцессора реактора и статического преобразователя

Цепь выпрямленного напряжения представлена источником напряжения по причине неприспособленности программной среды Multisim 11 для воспроизведения алгоритмов сложных системы управления. Три блока HB1, HB2 и HB3 включают в себе ГСР в соответствии с рисунком 3.14. Блок HB1, на который поступает управляющее воздействие (задание напряжения) от V4, реализует ШИМ.

Результаты моделирования приведены на рисунках 3.19, 3.20.

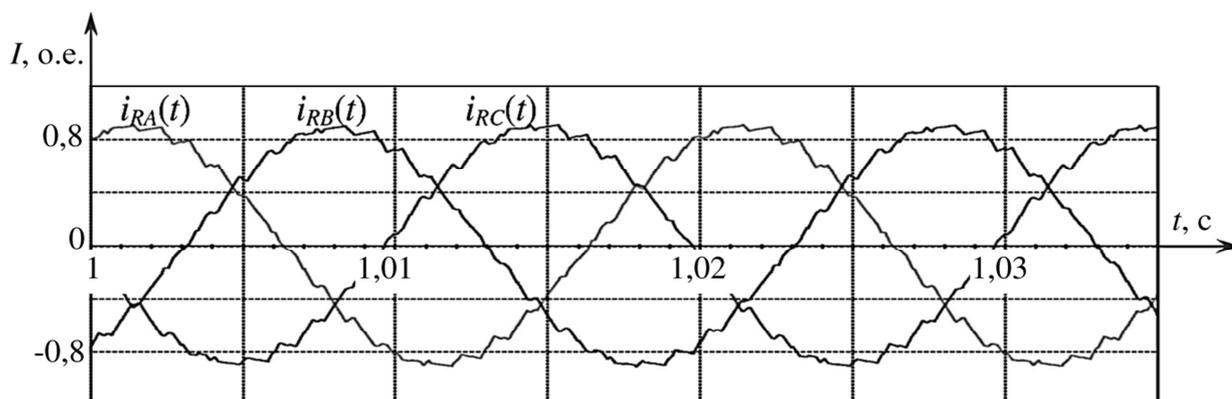


Рис. 3.19. Осциллограммы фазных токов модели реактора и статического преобразователя

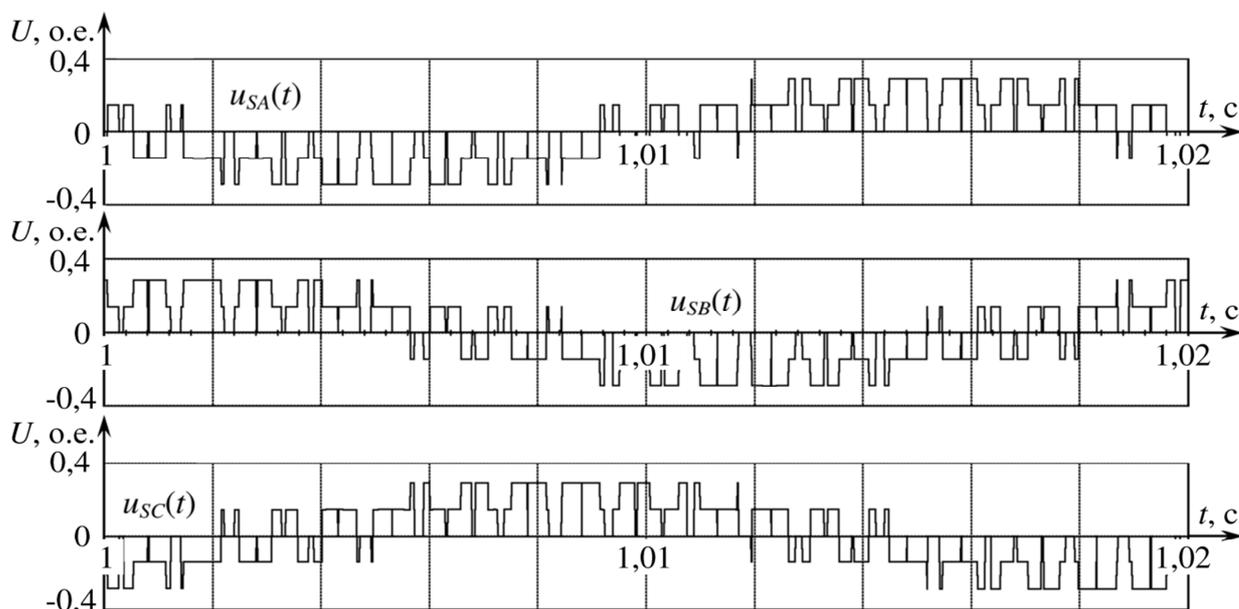


Рис. 3.20. Осциллограммы фазных напряжений модели реактора и статического преобразователя

Осциллограммы напряжений на стороне трехфазного напряжения полученные в результате ШИМ имеют форму, близкую к синусоидальной, напряжения фаз A , B и C сдвинуты друг относительно друга на 120° , что свидетельствует об адекватности функционирования СП. Осциллограммы токов аналогично имеют форму близкую к синусоидальной и так же сдвинуты друг относительно друга на 120° . Форма тока не изменяется ступенчато, а имеет сглаженный характер, что соответствует токам сглаживающих реакторов в реальных СТАТКОМ при коммутации СП.

Адекватность воспроизведения частотного спектра связана во многом со скоростью реакции сопроцессора реактора на ступенчато изменяющееся напряжение. Реакция сопроцессора определяется в основном скоростью нарастания напряжения на выходе повторителя напряжения, вход которого физически подключен к фазе СП. Время изменения сигнала напряжения на выходе повторителя может не совпадать с интервалом времени коммутации ПП вентиля СП, например время изменения сигнала напряжения на выходе повторителя составляет ~20 мкс для выбранного операционного усилителя, в то время как на в IGBT время изменения состояния составляет 3-5 мкс. Для обоснования необходимости выбора элементной базы, обеспечивающей полное совпадение по временным интервалам коммутации произведем оценку влияния времени реакции контура ГСР по напряжению на точность воспроизведения напряжения задания на СП для различных частот коммутации и значений выпрямленного напряжения.

Если время между коммутациями больше либо равно времени изменения состояния напряжения (20 мкс), то погрешность по амплитуде на цикле коммутации равна нулю. Погрешность по фазе или запаздывание по фазе составляет половину времени изменения напряжения (10 мкс). Если время между событиями коммутации меньше времени полного изменения состояния напряжения, то появляется погрешность по амплитуде.

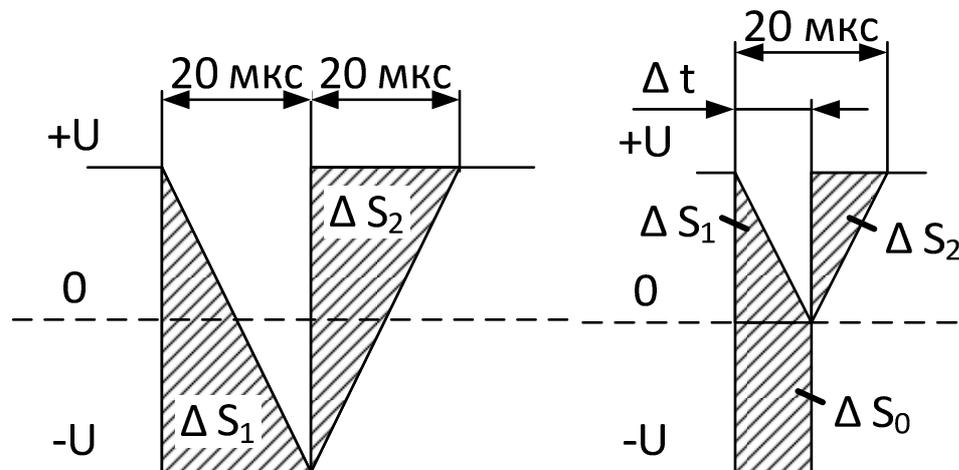


Рис. 3.21. Диаграмма напряжения на входе и выходе повторителя

Погрешность ΔS_0 определена по выражению

$$\Delta S_0 = \Delta t \cdot 2U - \Delta t^2 \frac{dU}{dt}$$

Максимальное значение погрешности проявляется при равенстве нулю производной по времени, то есть при Δt равной половине времени изменения состояния напряжения и в данном случае составляет $7B \times 10 \text{ мкс}$.

$$\Delta t_M = \frac{U}{\frac{dU}{dt}}$$

Значения максимальных погрешностей для различных частот коммутации приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5. Максимальная погрешность на цикле коммутации, обусловленная динамическими свойствами операционной элементной базы

Частота коммутации	$\frac{dU}{dt}$	Площадь	Максимальная относительная погрешность
500 Гц	14В/20мкс	0,028 В·с	0,25 %
1050 Гц	14В/20мкс	0,0133 В·с	0,525 %
1650 Гц	14В/20мкс	0,0085 В·с	0,825 %
5000 Гц	14В/20мкс	0,0028 В·с	2,5 %

Ввиду малости значения максимальной погрешности и низкой частотности ее проявления, индивидуальный подбор элементной базы нецелесообразен на частотах коммутации вентилях до 1650 Гц и для ПП вентилях с интервалами времен коммутации от 0 до 40 мкс, то есть практически для всех СТАТКОМ с СП на базе IGBT-транзисторов и IGCT-тиристоров.

3.2.4 Компьютерная модель гибридного сопроцессора цепи выпрямленного напряжения

Компьютерная модель схемы цепи выпрямленного напряжения, соответствующая функциональной схеме на рисунке 2.6, приведена на рисунке 3.22.

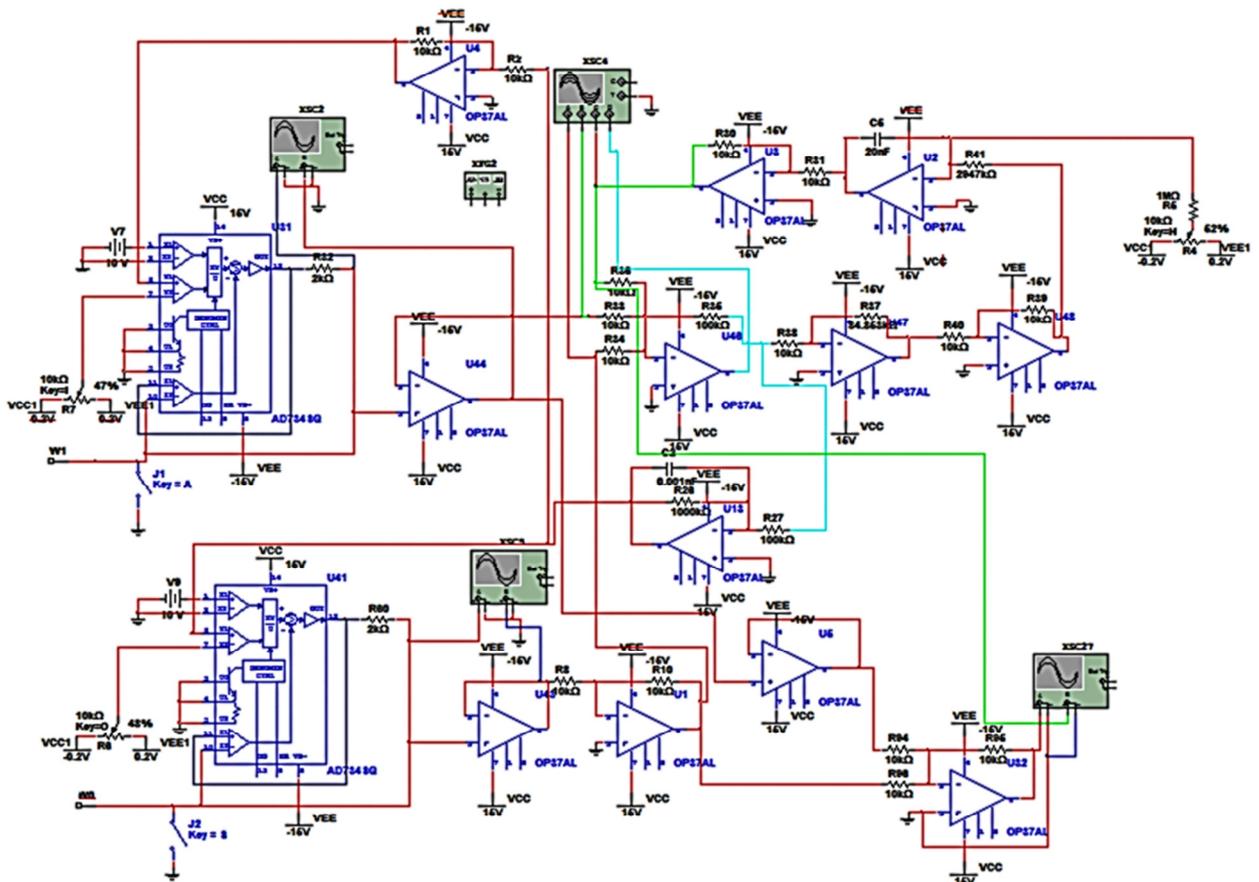


Рис. 3.22. Компьютерная модель цепи выпрямленного напряжения

Результаты моделирования схемы сопроцессора цепи выпрямленного напряжения, при моделировании КБ, приведены на рис. 3.23, сигнал тока, сформированный в результате решения при подаче входного синусоидального напряжения, имеет синусоидальную форму и опережает напряжение на угол близкий к 90° .

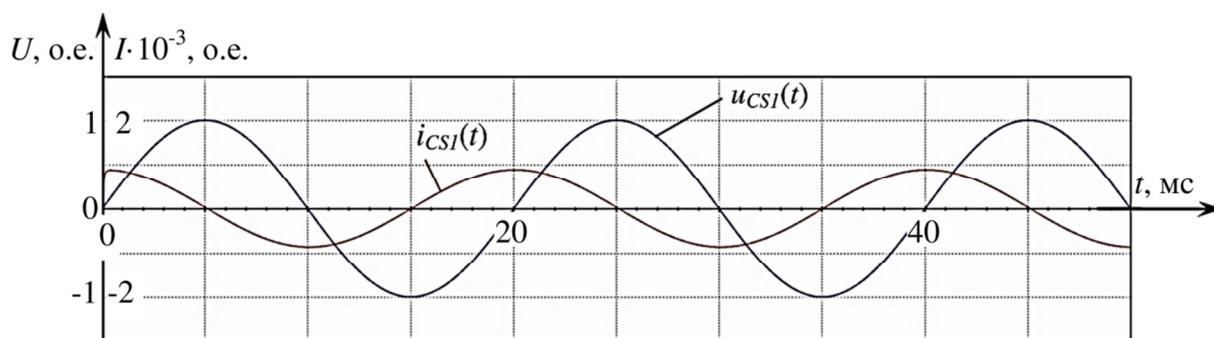


Рис. 3.23. Осциллограммы напряжения и тока сопроцессора цепи выпрямленного напряжения

Частотные характеристики схемы не могут быть построены встроенным программным анализатором, поэтому для их построения была проведена серия экспериментов с получением установившихся режимов для источниками переменного напряжения различной частоты. Результаты экспериментов сведены в таблицу 3 и представлены на рисунке 3.24.

Таблица 3.6. Частотные характеристики модели

№ пп.	Частота, Гц	Коэффициент передачи	Логарифмический коэффициент передачи	Угол опережения, градусы
1	1	0,0217	-33,25	87,77
2	10	0,218	-13,23	88,48
3	50	1,085	0,71	83,65
4	100	2,131	6,57	77,76
5	464,14	7,129	17,05	44,43
6	1000	9,095	19,18	24,67
7	10000	9,996	20,00	2,14

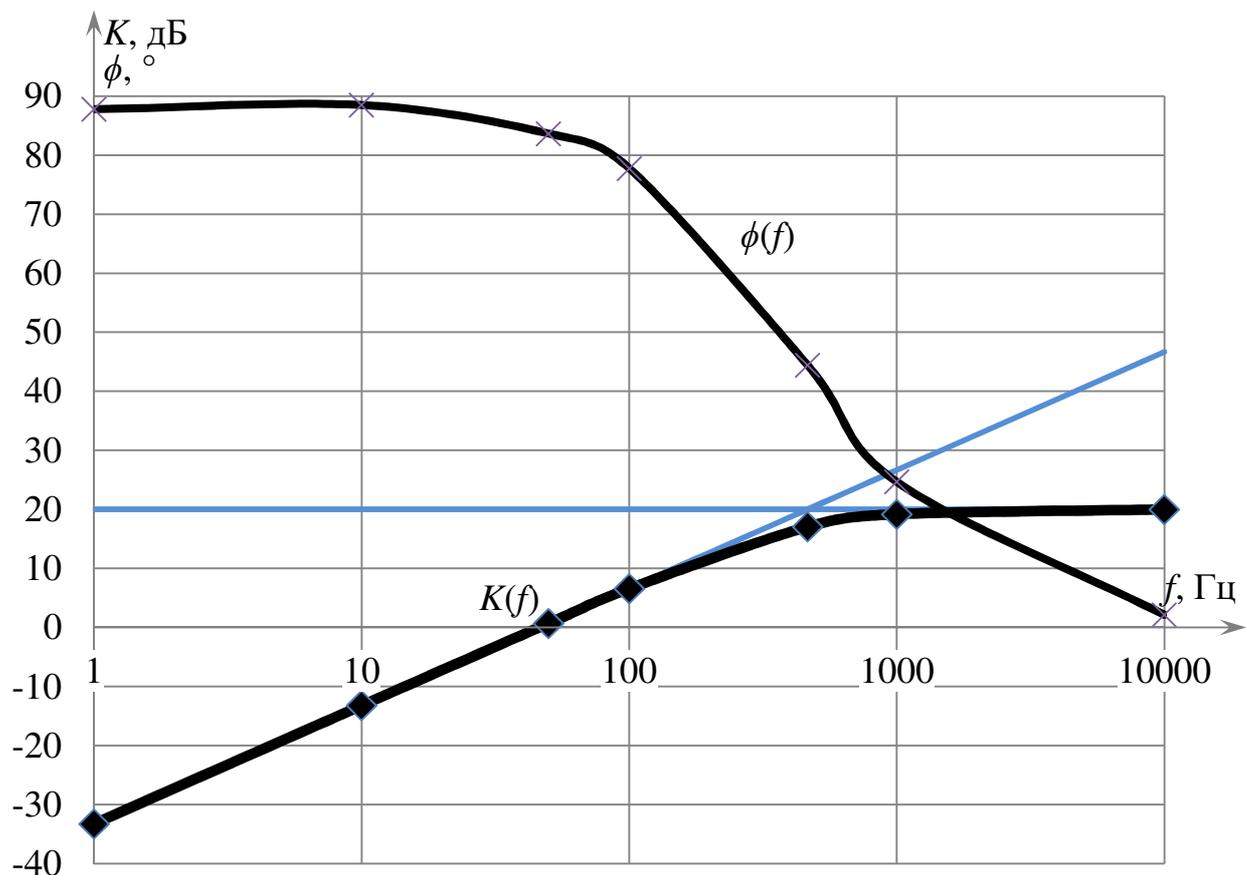


Рис. 3.24. ЛАЧХ и ЛФЧХ модели КБ

ФЧХ сопроцессора изменяется в диапазоне от 90 до 0 градусов, что соответствует теоретически ожидаемому значению. На частоте 1 Гц наблюдается некоторый спад угла опережения по сравнению с 10 Гц, что является отклонением от теоретически ожидаемого соотношения. Угол опережения на расчетной частоте сопряжения 464,14 Гц составляет 44,43°, примерно равен 45°. ЛАЧХ модели КБ соответствует расчетной в диапазоне частот до 10 кГц.

3.2.5 Компьютерная модель гибридного сопроцессора фильтра

Основной частотой, генерируемой СП на полностью управляемых ПП вентилях является несущая частота ШИМ. Поэтому фильтр настраивается на соответствующую частоту, обычно лежащую в диапазоне 0,5–2 кГц для рассматриваемой трехуровневой топологии СП. Настройка ГСФ, компьютерная модель которого приведена на рисунке 3.25, на заданную

частоту пропускания производится установкой соотношения параметров индуктивной и емкостной проводимостей. Величина ограничительного сопротивления (сопротивление на высокой частоте) устанавливается параметром R_{FA} для фазы A фильтра.

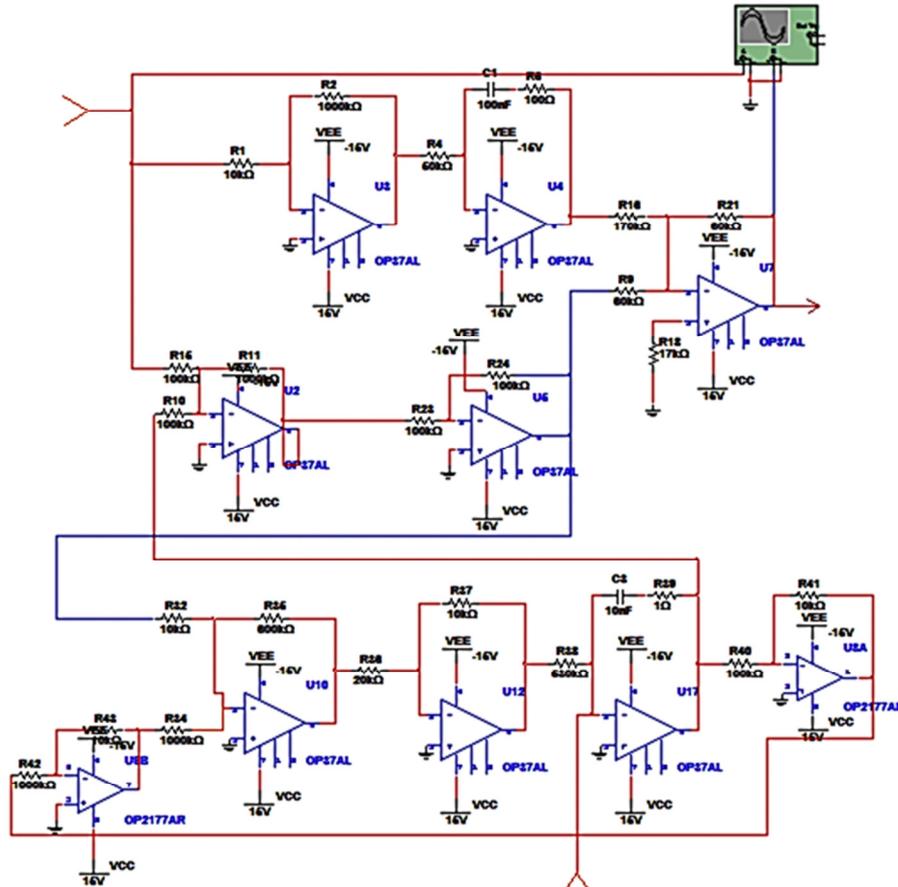


Рис. 3.25. Компьютерная модель сопроцессора фильтра

При исследовании свойств схемы, ГСФ был настроен на частоту 1 кГц. Диаграмма фазного напряжения, полученная при задании сигнала входного тока $i_{FA}(t) = 0,1 \sin(2\pi f_c t) + 0,1 \sin(2\pi f_k t)$, о.е., при $f_k=1$ кГц, $f_c=50$ Гц приведена на рис. 3.26.

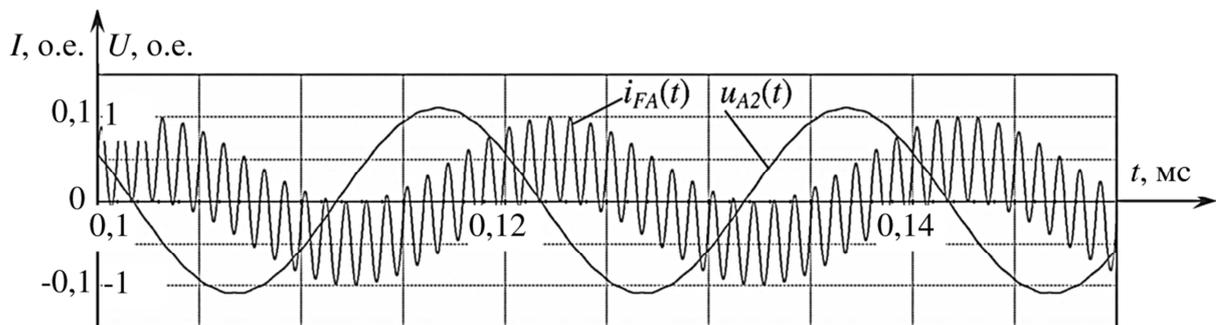


Рис. 3.26. Осциллограммы тока и напряжения модели фильтра

Диаграммы тока и напряжения подтверждают адекватность моделирования фильтра, так как амплитуда гармоники 1 кГц практически равна нулю, а угол опережения фазы тока составляет 90°, основная гармоника 50 Гц передана без искажения.

Передаточная функция фильтра, составленная на основе математического описания (2.4) и схемы замещения (рисунок 2.5) для построения теоретических частотных характеристик, определяется следующим выражением

$$W_F(p) = \frac{R_F L_F C_F p^2 + R_F R_{LF} C_F p + L_F p + R_F + R_{LF}}{L_F C_F p^2 + (R_F + R_{LF}) C_F p} \quad (3.1)$$

Логарифмические частотные характеристики для передаточной функции (3.1) и полученные в результате компьютерного моделирования модели аналоговой фильтра представлены в одних осях координат на рис. 3.27, 3.28.

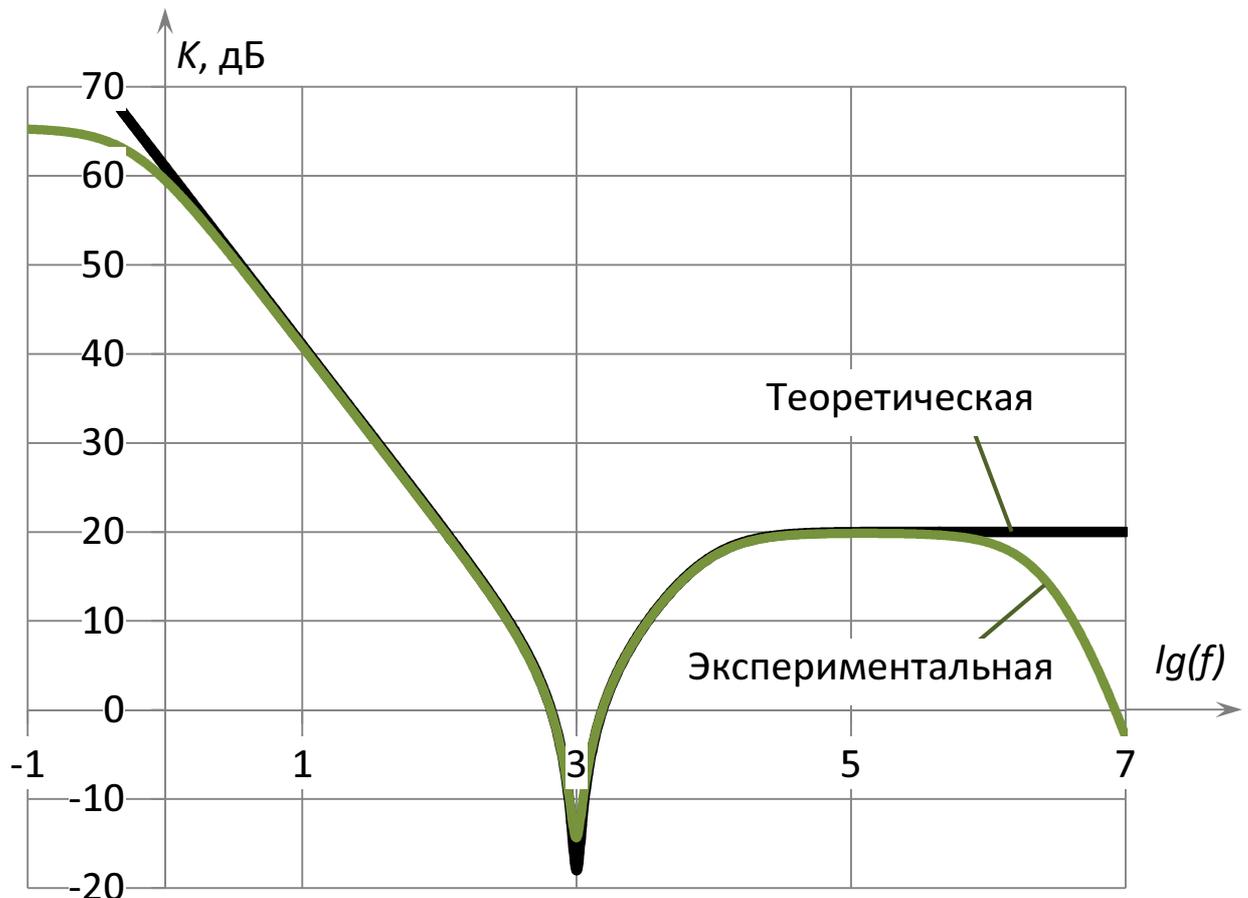


Рис. 3.27. ЛАЧХ схемы сопроцессора фильтра

Наклон логарифмической частотной характеристики в области низких частот равен минус 20 дБ/дек, в области высоких частот 20 дБ/дек до частоты на которой начинает сказываться влияние активного сопротивления, а на конечном участке, в области влияния сопротивления, наклон равен нулю.

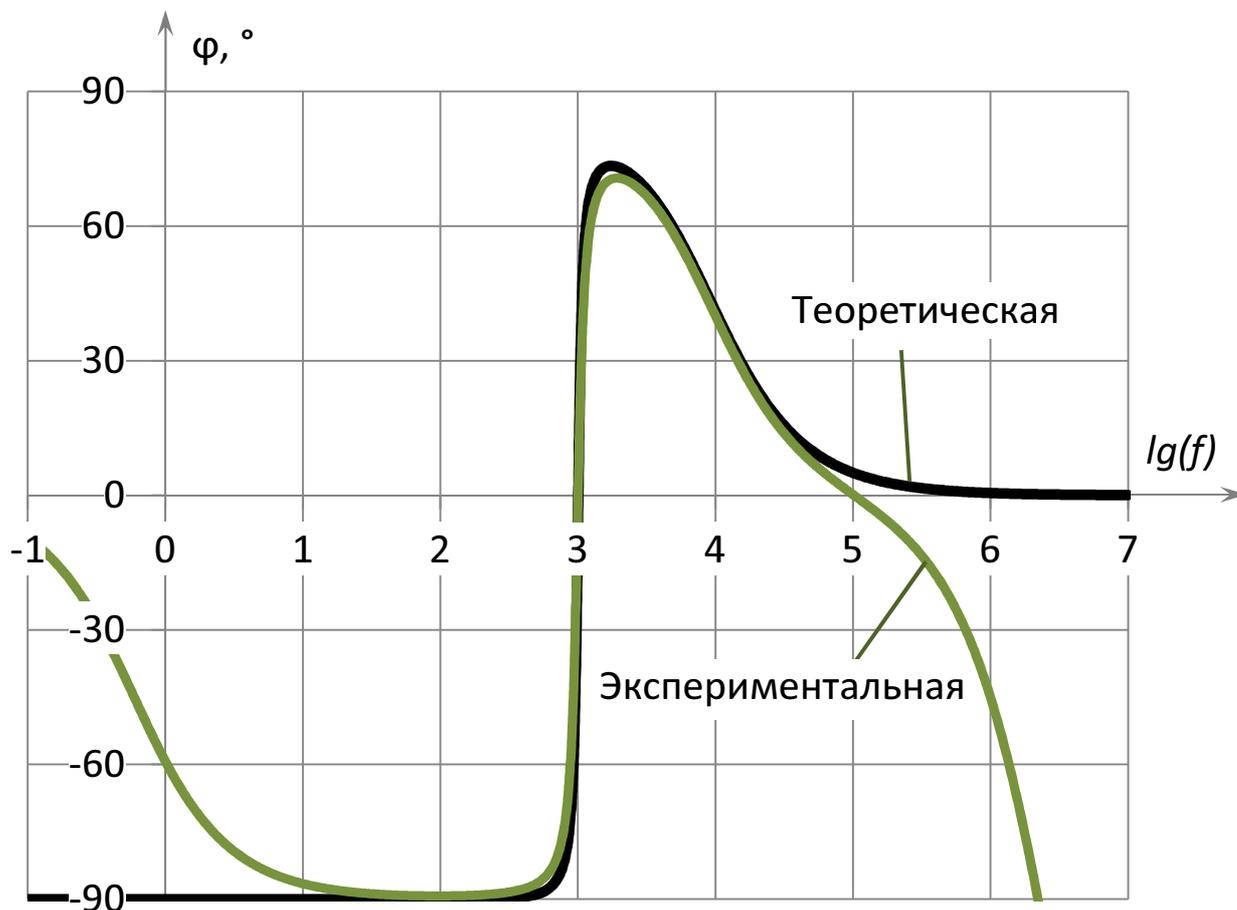


Рис. 3.28. ЛФЧХ схемы сопроцессора фильтра

Фазочастотная характеристика в диапазоне частот от нуля до частоты резонанса принимает значение минус 90° , а после, при равенстве токоограничивающего сопротивления нулю, достигает значения плюс 90° . При наличии резистора с ростом частоты фаза уменьшается до нуля.

Из графика видно, что экспериментальная характеристика совпадает с теоретической, рассчитанной для передаточной функции фильтра, для одних и тех же его параметров. Оценочный диапазон частот адекватного воспроизведения частотных свойств фильтра лежит в пределах 100 кГц для ЛАЧХ.

Частотные характеристики также подтверждают правильность настройки фильтра на частоту 1 кГц. На данной частоте наблюдается максимальный коэффициент подавления и опрокидывание фазы фильтра (ЛФЧХ на рис. 3.28). Справа от частоты настройки фильтра, его сопротивление имеет преобладающий емкостный характер, а слева – индуктивный. Диапазон адекватного воспроизведения ФЧХ лежит в пределах 20 кГц.

Возможность регулирования подавляющей способности фильтра показана на рис. 3.29. Регулирование производится параметром R_{LFA} для фазы A фильтра.

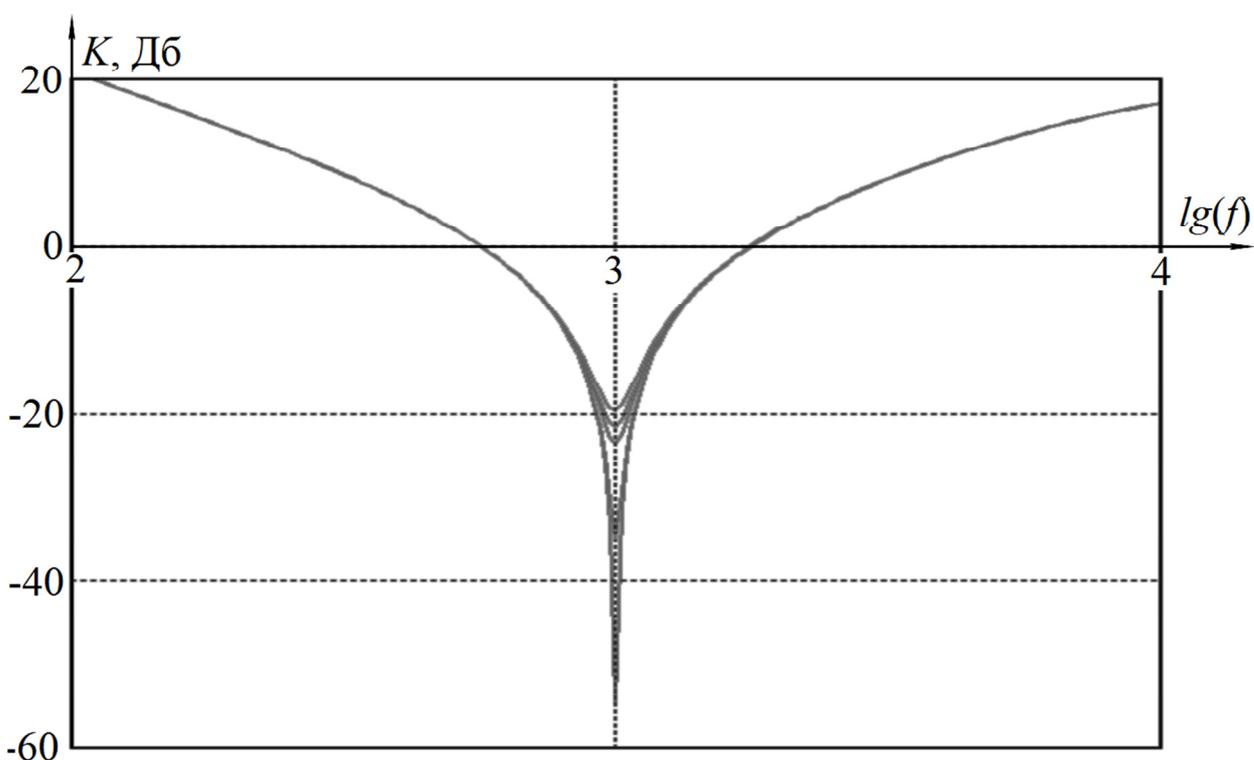


Рис. 3.29. ЛАЧХ модели полосового фильтра при различных подавляющих свойствах

Максимальный коэффициент подавления на частоте настройки фильтра, при прочих равных условиях составляет приблизительно минус 50 дБ. Соотношение коэффициентов передачи на частоте сети и несущей частоте ШИМ достигает 60 и более децибел (в 1000 раз).

Результаты исследования влияния величины ограничительного сопротивления приведены на рис. 3.30. При увеличении параметра R_{FA} линейнозависимо увеличивается и коэффициент передачи на высоких частотах, когда влияние индуктивности и емкости на эквивалентное сопротивление фильтра становится пренебрежимо мало. При изменении параметра R_{FA} начальный участок ЛАЧХ остается неизменным, а подавляющая способность фильтра снижается.

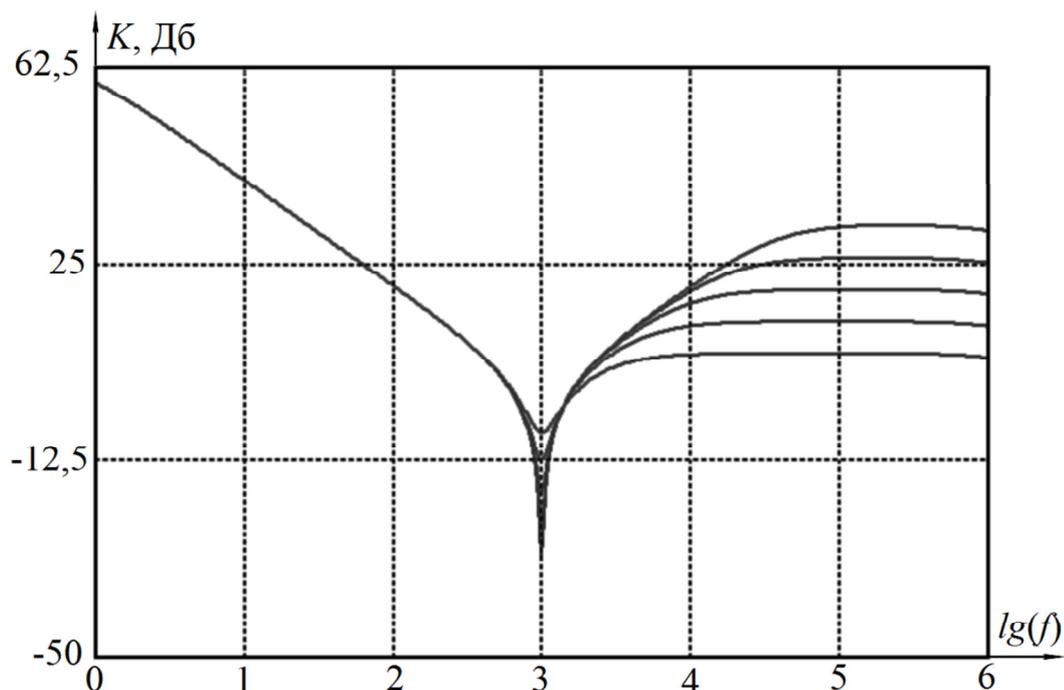


Рис. 3.30. ЛАЧХ модели полосового фильтра при различных параметрах резистора

Настройка резонансной частоты фильтра проводится путем выбора соответствующих номиналов емкости C КБ и индуктивности L реактора из соотношения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

где f_0 – резонансная частота фильтра.

Примеры настройки резонансной частоты сопроцессора фильтра с помощью изменения параметра емкости и индуктивности приведены на рисунках 3.31, 3.32 соответственно. Настройка произведена на частоты 250,

500, 1000, 2000 и 4000 Гц, перекрывающие весь диапазон частот коммутации вентилей СП СТАТКОМ на базе полностью управляемых ППВ.

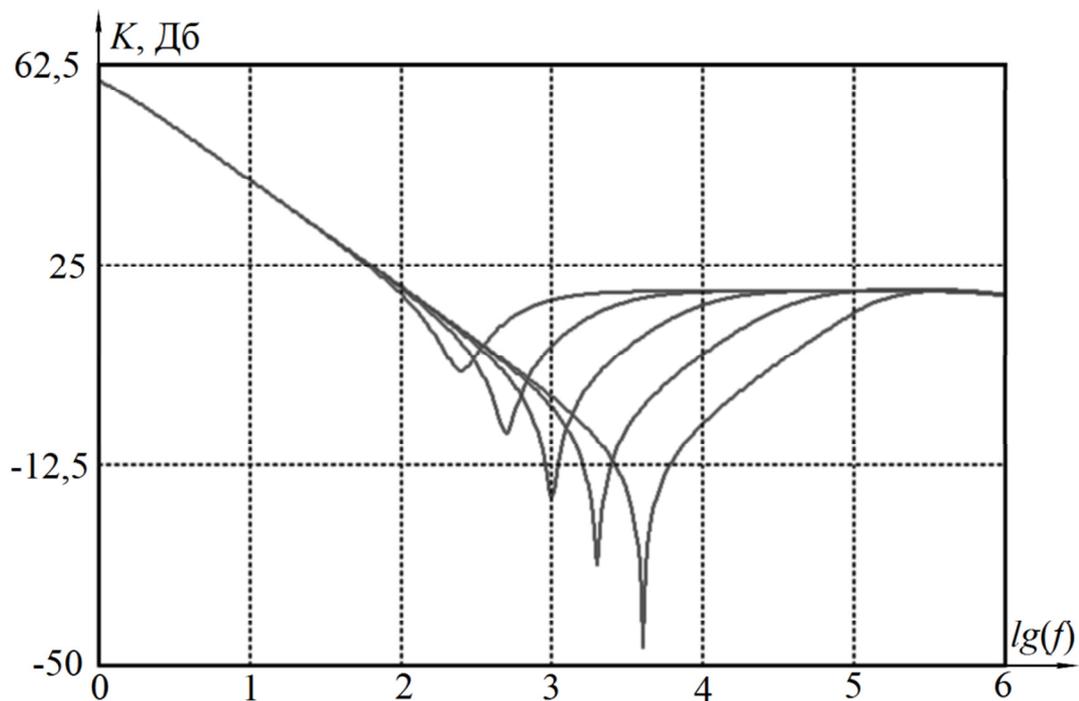


Рис. 3.31. ЛАЧХ модели полосового фильтра при различных параметрах индуктивности реактора

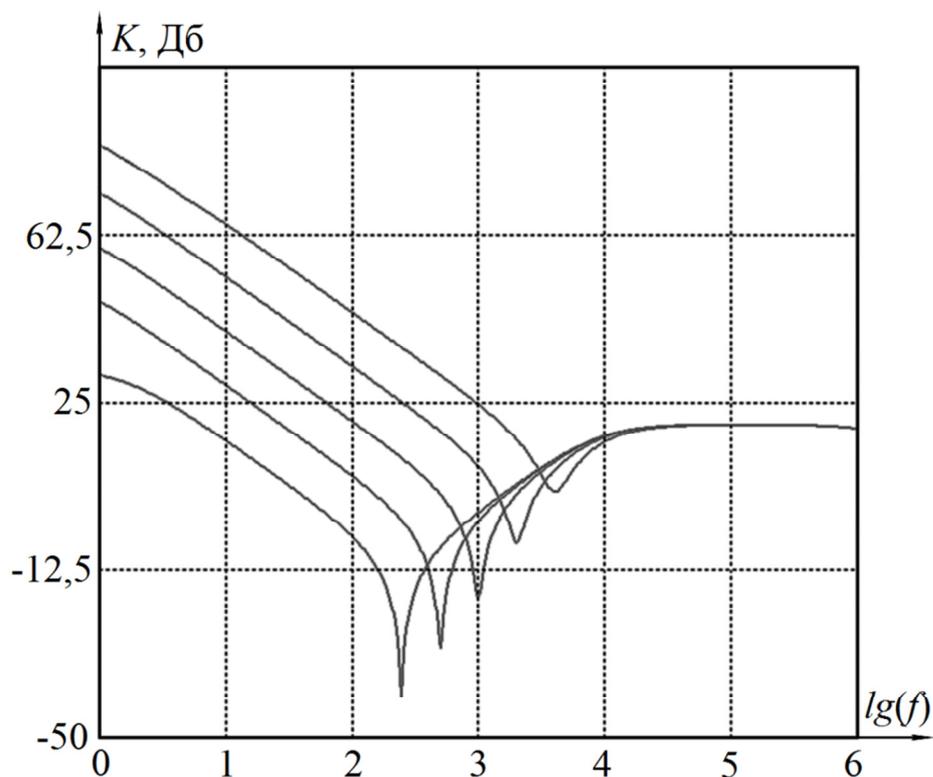


Рис. 3.32. ЛАЧХ модели полосового фильтра при различных емкостях конденсаторной батареи

На представленных ЛАЧХ (рис. 3.31, 3.32) выявлена зависимость подавляющей способности фильтра от изменения индуктивности и емкости. Для подтверждения правильности полученной зависимости проведен расчет зоны подавления, определяемой резонансными свойствами фильтра, при раздельном изменении индуктивности и емкости относительно начальных условий настройки. По результатам расчетов на основании передаточной функции фильтра получены ЛАЧХ схемы сопроцессора фильтра (рисунок 3.33).

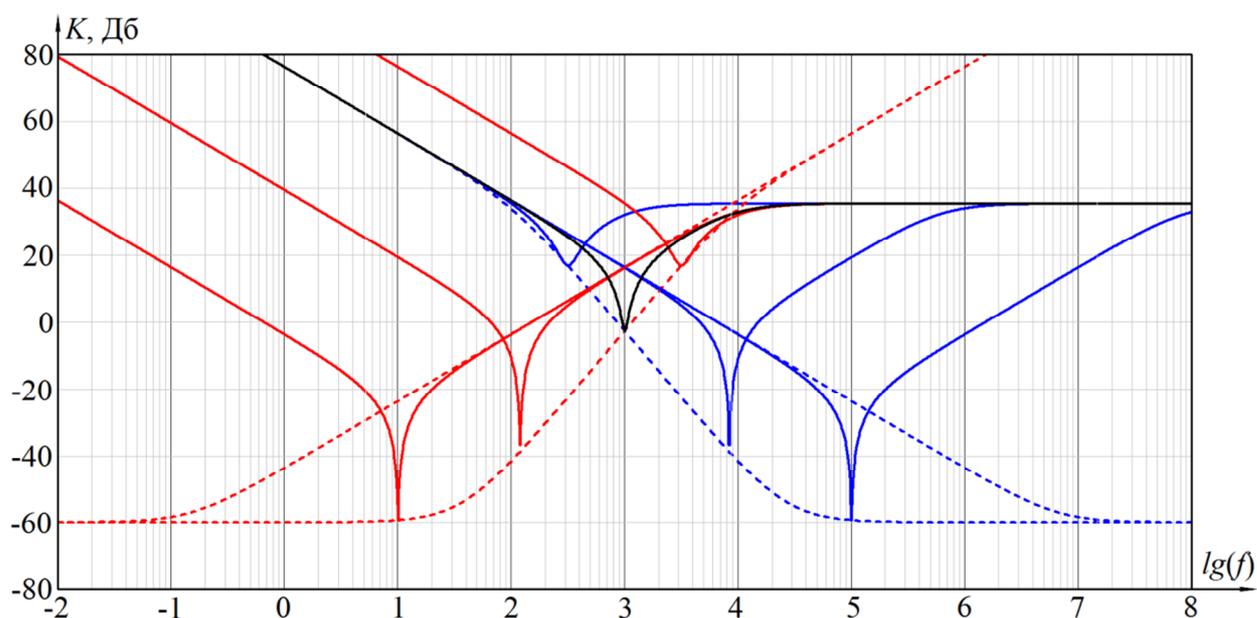


Рис. 3.33. ЛАЧХ фильтра при изменении индуктивности и емкости относительно начальных настроек

Штриховыми линиями на рис. 3.33 изображены зависимости коэффициента подавления от индуктивности и емкости фильтра, как видно характер изменения коэффициента подавления на рисунках 3.31, 3.32 совпадает с аналитически рассчитанными характеристиками.

Для решения задач выбора фильтра по подавляющей способности для заданной частоты, значения параметров индуктивности и емкости в модели фильтра изменяются в обратной зависимости друг от друга, что обеспечивает неизменность резонансной частоты. Пример изменения мощности фильтра при неизменном значении резонансной частоты приведен на рис. 3.34.

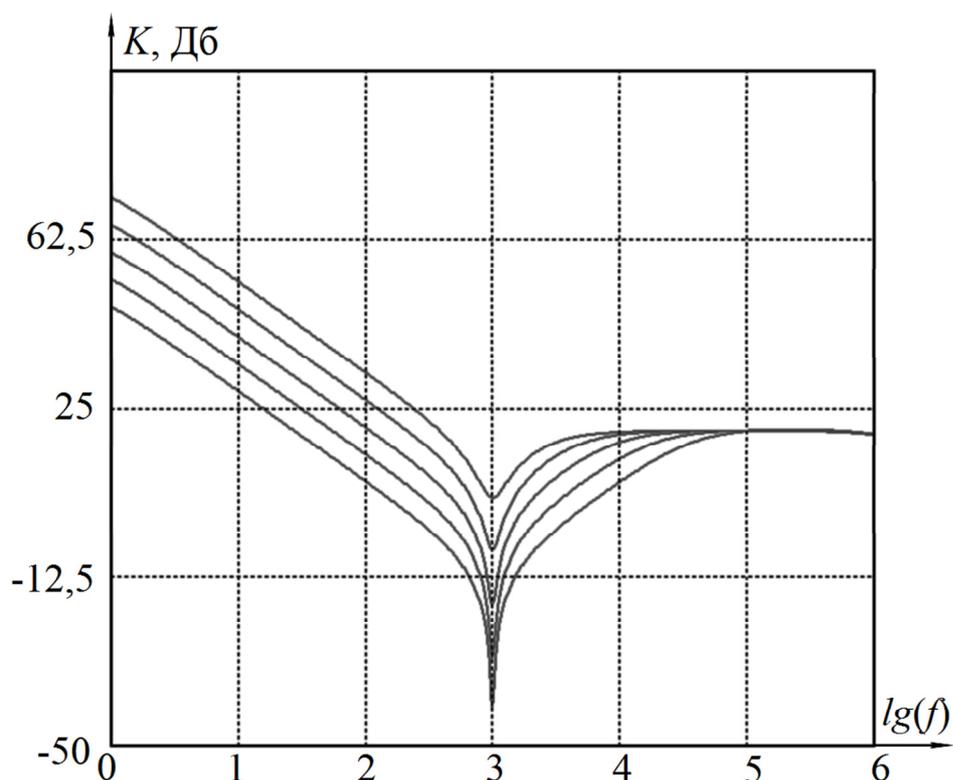


Рис. 3.34. ЛАЧХ модели полосового фильтра при различных мощностях установки

Для проверки частотных свойств модели произведена настройка на различные резонансные частоты 250, 500, 1000, 2000 и 4000 Гц при пропорциональном изменении значений индуктивности и емкости, эксперименты показали постоянство коэффициента усиления на резонансных частотах, что соответствует ожиданиям (рисунок 3.35). При настройке во всех случаях максимальное подавление наблюдалось на заданных резонансных частотах 250, 500, 1000, 2000 и 4000 Гц, что также подтверждает правильность модели.

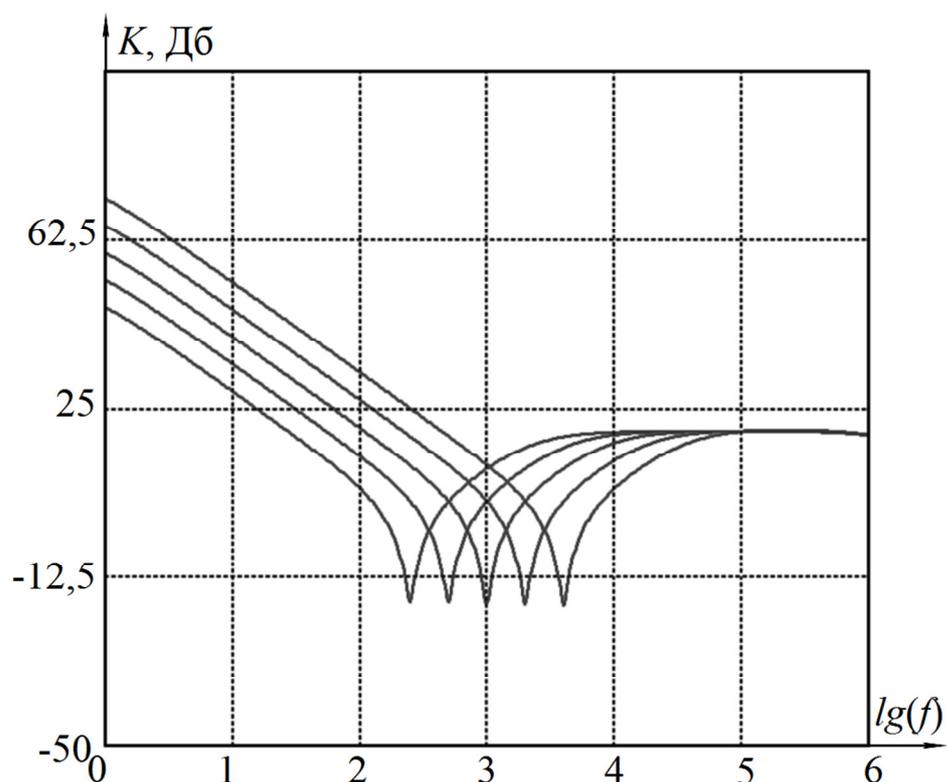


Рис. 3.35. ЛАЧХ модели полосового фильтра при пропорциональном изменении индуктивности и емкости

В случае если СП выполнен на базе тиристоров и частота коммутации равна частоте сети, то применяются полосовые фильтры, настраиваемые на нечетные высшие гармоники. Фильтры могут быть выполнены в виде последовательно соединенных реактора и КБ. На рисунке 3.36 изображены ЛАЧХ модели фильтра настроенного на нечетные гармоники с 3 по 15.

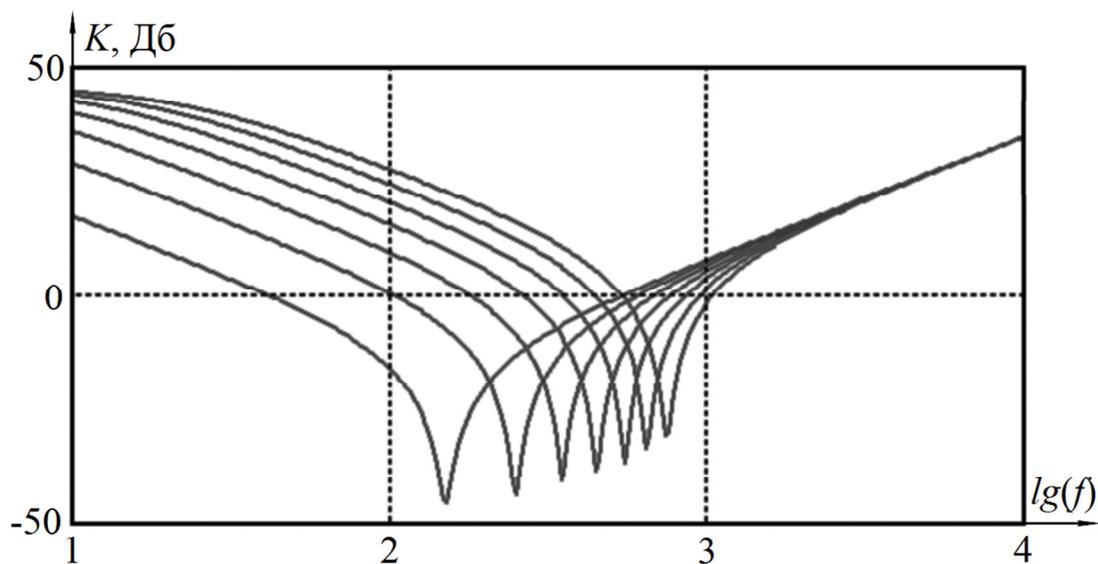


Рис. 3.36. ЛАЧХ модели полосового фильтра

Вне зависимости от настройки резонансной частоты и параметров модели фильтра компьютерное моделирование подтвердило адекватность воспроизведения процессов в требуемом диапазоне частот.

Полученные результаты предварительного компьютерного моделирования и исследования всех основных фрагментов разработанных математических моделей устройств и систем FACTS подтверждают их адекватность.

3.3 Блок микропроцессоров гибридного процессора СТАТКОМ

На блок микропроцессоров ГПС, помимо реализации алгоритмов САУ СТАТКОМ, возложена задача выполнения следующих функций необходимых для обеспечения процесса моделирования: управление параметрами моделей силового оборудования и системы управления; управление состояниями ЦУАК СП, продольной и поперечной коммутации; получение и преобразование данных АЦП в соответствии с информационной моделью представления первичных процессов в оборудовании; реализация взаимодействия с ЦП и периферийными процессорами, между ЦП и Сервером.

Выполнение всех перечисленных функций одним процессором невозможно, поэтому БМ содержит ЦП и периферийные процессоры, между которыми распределены указанные функции. Структура блока микроконтроллеров проиллюстрирована на рисунке 3.37. ЦП осуществляет управление параметрами моделей силового оборудования и системы управления, осуществляет коммуникацию с периферийными процессорами и Сервером.

Для индивидуального управления состояниями ЦУАК продольной, поперечной коммутации и СП ГПС использовано два процессора коммутации, первый для ГСТ, второй для ГСР, ГСЦВН и СП. Второй процессор коммутации выполняет алгоритм ШИМ, тип которого зависит от

моделируемой топологии СП. Поскольку от частоты выполнения алгоритма ШИМ зависит напряжение на трехфазной стороне модели СП (параграф 3.3) и, следовательно, адекватность моделирования СТАТКОМ в целом, то данная процедура является высокоприоритетной и основной, выполняемой в процессоре коммутации. В связи с этим процессор коммутации выполняет только необходимые функции коммуникации с ЦП, получения в реальном времени данных с уставками ШИМ с выхода САУ, и управление состояниями ЦУАК, что не требует больших дополнительных вычислительных ресурсов.

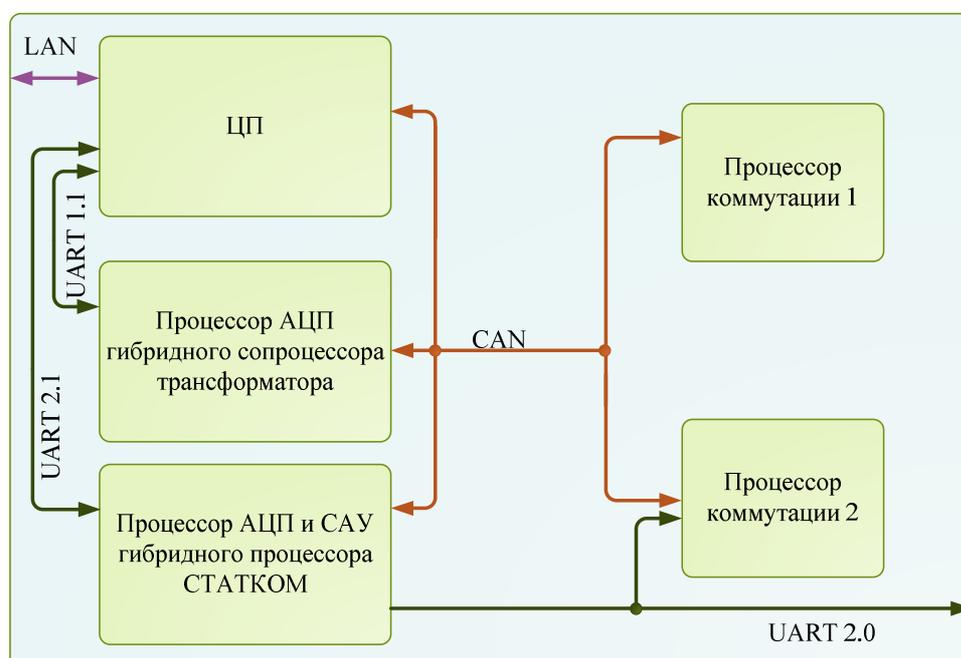


Рис. 3.37. Структурная схема блока микропроцессоров гибридного процессора СТАТКОМ

Остальные функции распределяются между процессором АЦП ГСТ и процессором АЦП и САУ ГПС. Процессор АЦП ГСТ выполняет функции получения данных АЦП результатов непрерывного моделирования трансформатора, осуществляет расчет мгновенных значений полной, активной, реактивной мощностей и действующих значений электрических величин и выполняет функции взаимодействия с ЦП.

Процессор АЦП и САУ ГПС реализует алгоритмы САУ СТАТКОМ, получает данные АЦП результатов непрерывного решения в гибридных

сопроцессорах фильтра, реактора и цепи выпрямленного напряжения, и преобразует полученные данные в соответствии с информационной моделью представления первичных процессов в оборудовании. Кроме этого Процессор АЦП и САУ выполняет функции взаимодействия с ЦП и со вторым процессором коммутации для передачи значений уставок ШИМ.

Взаимодействие между отдельными процессорами внутри БМ и с внешними устройствами производится по цифровым шинам. Центральный процессор связан с сервером по локальной сети LAN, а с периферийными процессорами по контроллерной шине CAN0 для задания параметров САУ, состояний ЦУАК. Процессор АЦП ГСТ и процессор АЦП и САУ соединены с ЦП шинами UART X.1 для передачи мгновенных и действующих значений, полученных в результате АЦП и расчета. Шина UART 2.0 соединяющая процессор АЦП и САУ со вторым процессором коммутации служит для передачи уставок ШИМ. Для взаимодействия с внешней моделью СП, реализующей другие топологии, не заложенные в ГПС, задействуется та же шина UART 2.0.

Представленная структура БМ и распределение функций между центральным и периферийными процессорами позволяют обеспечить достаточное быстродействие в выполнении возложенных на БМ функций, возможность независимой разработки САУ и алгоритмов ШИМ в соответствии с СП и наблюдения результатов моделирования.

3.4 Разработка специализированного программного обеспечения средств моделирования СТАТКОМ

В соответствии с многоуровневой информационной моделью, представленной в разделе 1, для обеспечения работы ГПС в составе комплекса ВМК РВ ЭЭС, разработано программное обеспечение на уровне Сервера, на уровне ЦП и периферийных процессоров БМ и создан интерфейс для задания параметров модели в соответствии со схемой замещения и

наблюдения в реальном времени результатов моделирования на уровне Клиента. На уровне Сервера и в ЦП ГПС программное обеспечение отличается от ПО моделей другого оборудования ЭЭС только работой с параметрами.

В БМ реализованы все перечисленные в п. 3.2 функции. Блок-схема программы процессора АЦП и САУ ГПС представлена рисунке 3.38.

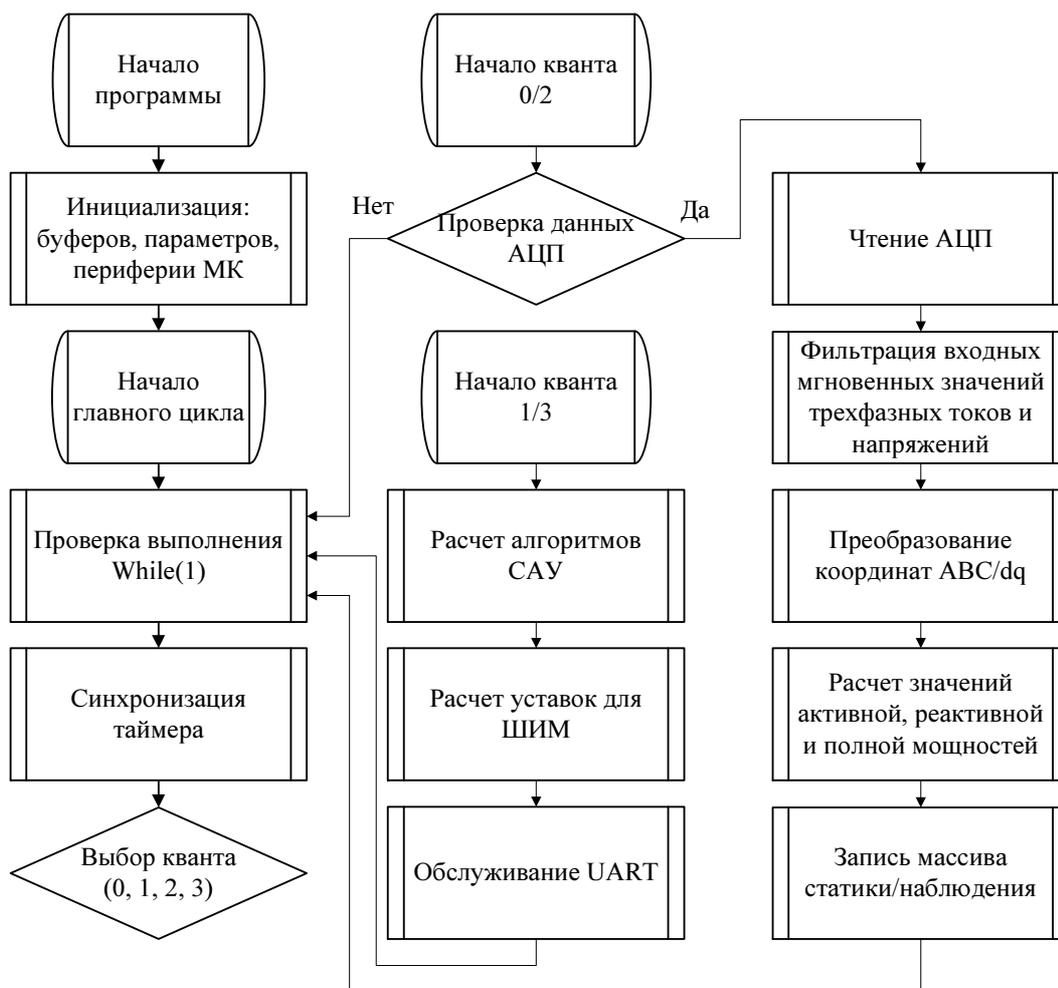


Рис. 3.38. Блок-схема алгоритма программы процессора АЦП и САУ

При запуске программы выполняется инициализация: PIO – программируемых вводов-выводов микроконтроллера; массивов данных мгновенных действующих значений измерений и расчета; конфигурация структуры и параметров модели САУ СТАТКОМ; интерфейсов CAN, DBGU (для программирования от персонального компьютера), UART и SPI; получения данных АЦП; TC2 (таймер); FIQ (быстрые прерывания). Далее

выполняется основной цикл программы 200 мкс, включающий четыре кванта по 50 мкс каждый.

В квантах 0 и 2 выполняется проверка готовности данных АЦП и чтение из АЦП, расчет фильтра мгновенных значений, расчет преобразования координат ABC/dq, расчет мгновенных значений мощностей на первичной обмотке и запись массива данных для передачи данных моделирования в ЦП. В квантах 1 и 3 Реализован расчет алгоритмов САУ и уставок для ШИМ, а также формирование пакета данных и его передача в процессор коммутации. Кроме того на каждом кванте 50 мкс выполняется алгоритм синхронизации.

Таким образом задержка в цепи управления составляет 100 мкс, в течение этого времени процессор АЦП и САУ успевают выполнить все необходимые процедуры, связанные с моделированием СТАТКОМ. При реализации сложных алгоритмов САУ, требующих больших вычислительных ресурсов, период выполнения расчетов может быть увеличен, однако анализ САУ свидетельствует об отсутствии необходимости в таких действиях.

Блок-схема программы процессора коммутации представлена рисунке 3.39.

Тестирование программ подтвердило правильность их работы, временные характеристики выполнения процедур приведены в таблице 3.7.

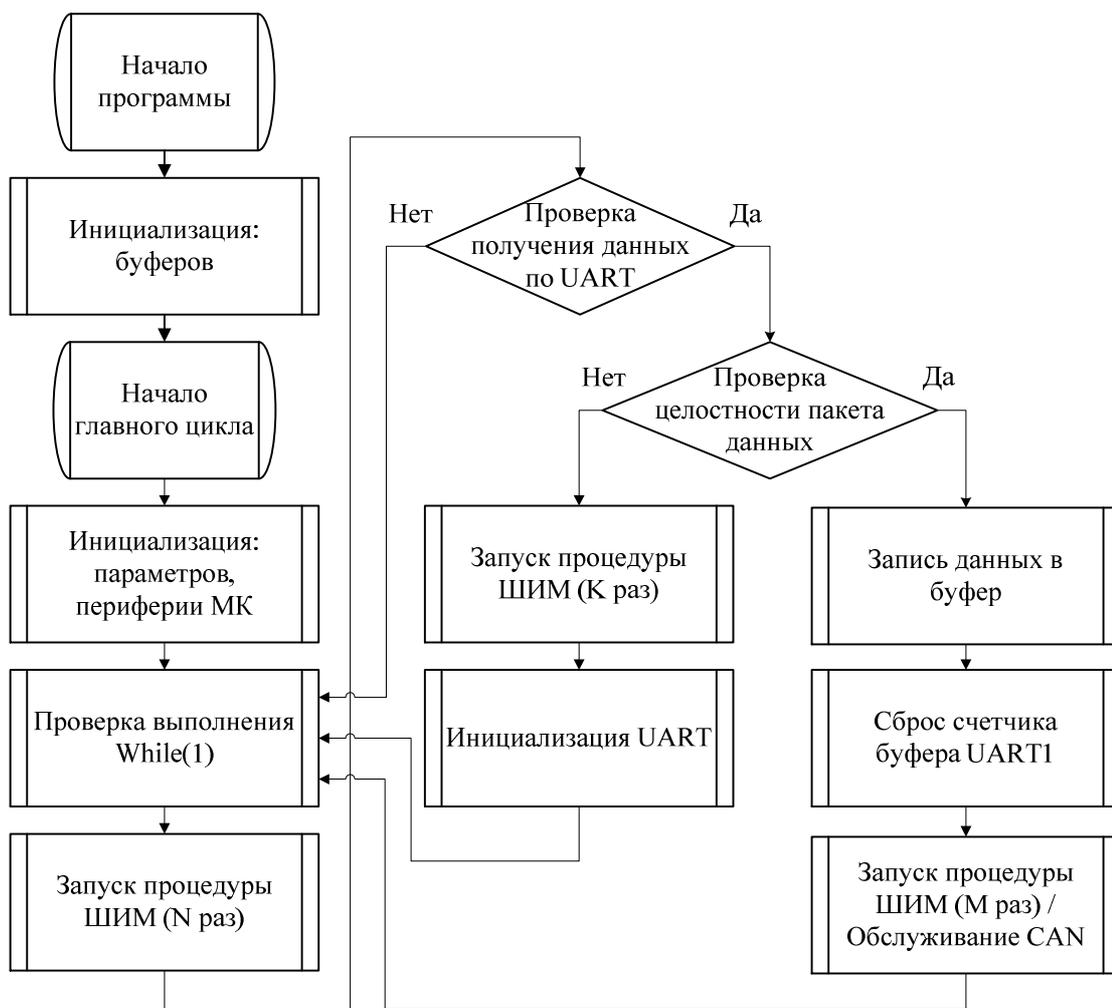


Рис. 3.39. Блок-схема алгоритма программы процессора коммутации

Таблица 3.7. Временные затраты на выполнение основных процедур

Процедура	Временные затраты
В процессоре АЦП и САУ	
Фильтрация (18 каналов)	8 мкс
Преобразование ABC/dq	11,5 мкс
Расчет PQS	1 мкс
Расчет действующих значений	2 мкс
Расчет уставок для ШИМ	1,8 мкс
Чтение АЦП	12 мкс
Расчет базовых алгоритмов САУ	10 мкс
В процессоре коммутации	
ШИМ	2,5 мкс

Обязательные алгоритмы преобразования координат выполняются в двух квантах, при этом для надстройки САУ остаются доступны примерно 30 мкс свободного времени процессора АЦП и САУ, что позволяет реализовать до 10 дополнительных регуляторов.

Поскольку расчет САУ выполняется не мгновенно, а с определенным периодом, образуется задержка в цепи управления дискретная и появляется дискретность в обновлении значения уставок для ШИМ что приводит к отличию момента времени коммутации ключа от идеального случая. Это приводит к погрешности формируемой уставки для ШИМ. Кроме того процедура ШИМ выполняется программно, что обеспечивает погрешность воспроизведения трехфазного напряжения СП относительно заданной уставки.

Теоретически ожидаемые максимальные погрешности 1,8 градуса, соответствующая задержкам в обновлении значения синуса и косинуса угла раз в 100 мкс. Максимальная погрешность будет наблюдаться для момента перехода через ноль напряжения задания, так как в этот момент наблюдается максимальное по модулю значение производной. Исходя из первого замечательного предела максимальные погрешности при заданной дискретности составляют

$$\Delta U_N = \frac{\pi U_M}{N/4}$$

где N – число тактов за период сетевой частоты равное 200 для периода выполнения АЦП и САУ 100 мкс;

U_M – амплитуда напряжения.

Таким образом, максимальная погрешность определяемая дискретностью выполнения алгоритмов АЦП и САУ составляет 3,14 процента.

Определение погрешности, связанной с дискретностью выполнения ШИМ, произведено по принципу, проиллюстрированному на рисунке 3.40.

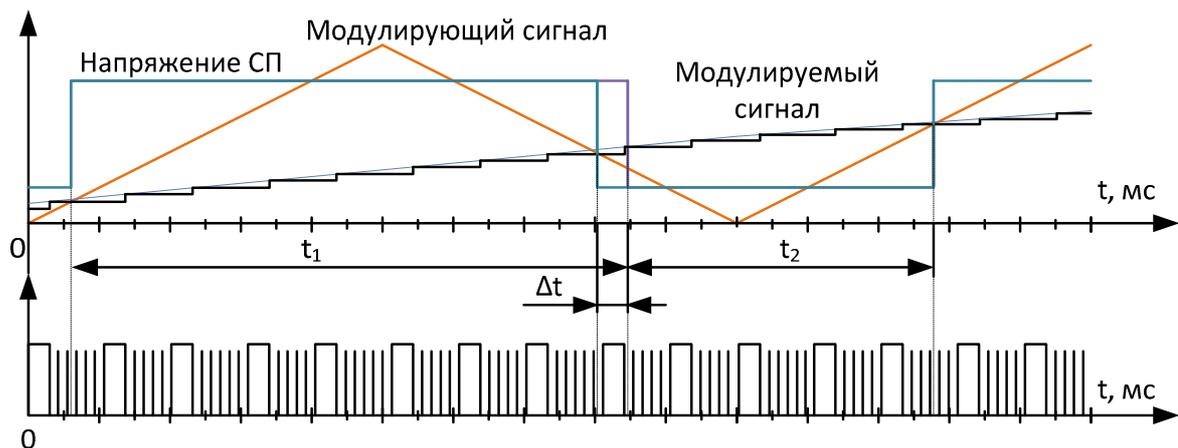


Рис. 3.40. Диаграммы выполнения алгоритма ШИМ

Принцип модуляции основан на сравнении модулируемого сигнала (полученного от процессора АЦП и САУ) с модулирующим (пилообразный, полученный с помощью аппаратного таймера микроконтроллера). Поскольку сравнение производится программно через определенные интервалы времени, то момент времени, в котором модулирующий и модулируемый сигналы равны, идентифицируется с ошибкой Δt , которая и будет определять погрешность воспроизведения трехфазного напряжения СП.

Заданное напряжение на цикле коммутации составляет

$$U_3 = (t_1 - \Delta t)U_{\Pi} - (t_2 + \Delta t)U_{\Pi} = (T_K - 2t_2 - 2\Delta t)U_{\Pi},$$

где T_K – время цикла коммутации ключа;

t_1, t_2 – время пребывания в прямом и обратном включении преобразователя.

Среднее напряжение на цикле коммутации равно

$$U_{CP} = t_1 U_{\Pi} - t_2 U_{\Pi} = (T_K - 2t_2)U_{\Pi},$$

Абсолютная погрешность ШИМ определяется на каждом цикле коммутации по выражению

$$\Delta U = |U_3 - U_{CP}| = |(T_K - 2t_2 - 2\Delta t)U_{\Pi} - (T_K - 2t_2)U_{\Pi}| = 2\Delta t U_{\Pi}$$

Относительная погрешность ШИМ определяется на каждом цикле коммутации по выражению

$$\Delta U_{OTH} = \frac{\Delta U}{\Delta U_{CPVIXM}} = \frac{2\Delta t_M U_{\Pi}}{T_K U_{\Pi}} = \frac{2\Delta t}{T_K},$$

где $U_{\text{СРВЫХМ}} = T_{\text{к}} U_{\text{П}}$ – максимальный уровень среднего выходного напряжения СП.

Максимальное временное отклонение определено из выражения

$$\Delta t_{\text{М}} = t_{\text{зап}} + t_{\text{ШИМ}},$$

где $t_{\text{ШИМ}}$ – время, затрачиваемое на выполнения процедуры ШИМ;

$t_{\text{зап}}$ – время записи данных, полученных от процессора АЦП и САУ (наиболее длительная программная процедура).

Рассчитанная максимальная погрешность для ПТС моделирования СТАТКОМ с разработанной программой, в которой $t_{\text{ШИМ}} = 2,5$ мкс, $t_{\text{зап}} = 4,5$ мкс для частоты коммутации 1050 Гц равна

$$\Delta U_{\text{ОТНМ}} = \frac{2\Delta t}{T_{\text{к}}} = \frac{14 \cdot 10^{-6}}{1/1050} = 1,47 \%,$$

Поскольку алгоритм ШИМ выполняется гораздо чаще записи данных, полученных от процессора АЦП и САУ, то возникновение такой погрешности маловероятно. Более вероятно возникновение максимальной погрешности, определяемой только временем выполнения процедуры ШИМ, которая составляет

$$\Delta U_{\text{ОТНМ}} = \frac{2\Delta t}{T_{\text{к}}} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{1/1050} = 0,525 \%.$$

Рассчитанные величины погрешности не оказывают значительного влияния на адекватность моделирования.

На уровне клиента для управления и наблюдения параметров моделируемого СТАТКОМ разработаны формы представления модели для схемы силового оборудования (рисунок 3.41) и для системы управления СТАТКОМ (рисунок 3.42). На форме силовой схемы пользователем могут быть изменены состояния выключателей, способ присоединения (через трансформатор или непосредственно к шинам подстанции), тип СП (трехуровневый, двухуровневый и тип ключа полностью управляемый или не полностью управляемый), тип фильтра (КБ, КБ-резистор, полосовой фильтр или комбинированный). В реальном времени могут быть заданы электрические параметры реакторов, КБ и резисторов всех элементов схемы.

На панелях измерительных приборов динамически отражаются действующие значения токов и напряжений на выводах первичной обмотки трансформатора (параметры точки присоединения) и реактора (токи и напряжения реактора), а также реактивная мощность СТАТКОМ. На стороне выпрямленного напряжения динамически индицируются значения напряжений на полюсах СП.

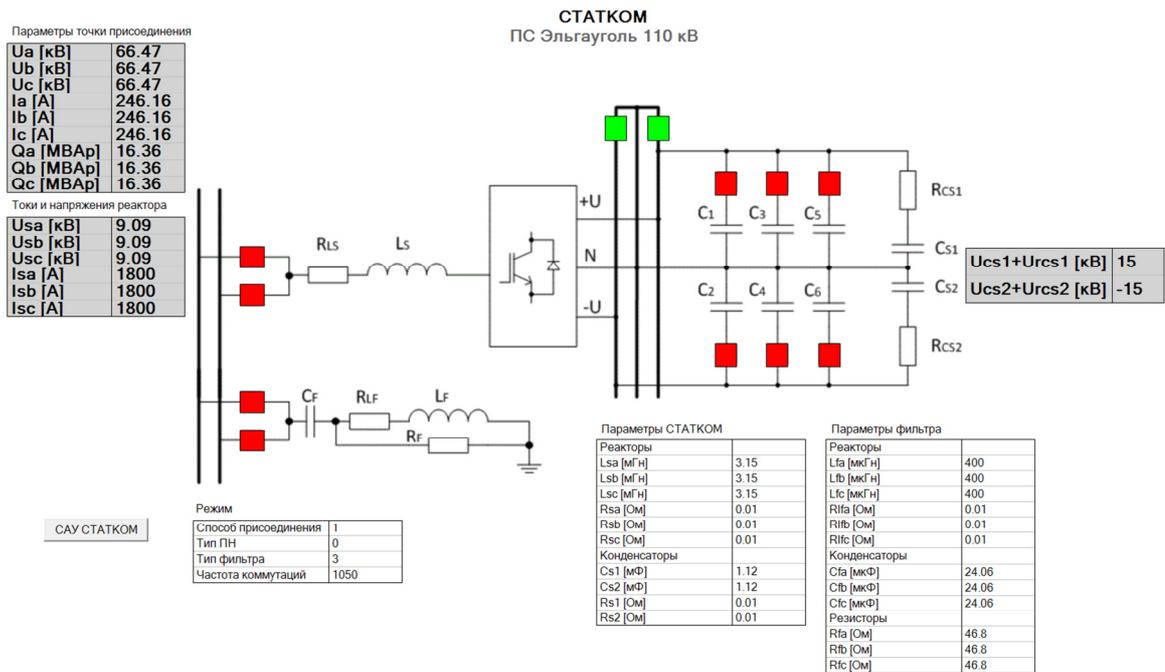


Рис. 3.41. Форма представления модели силовой схемы СТАТКОМ

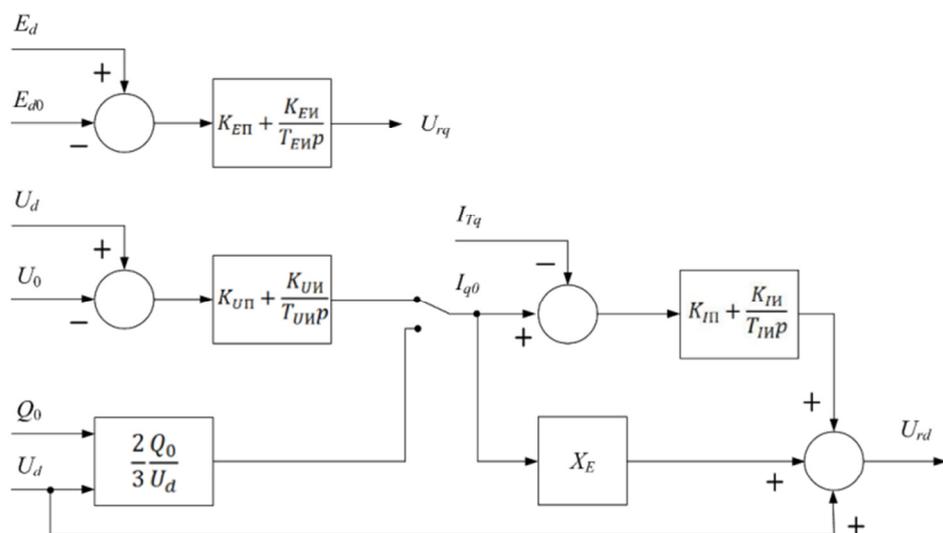


Рис. 3.42. Форма представления модели системы автоматического управления СТАТКОМ

На форме САУ в соответствии с приведенной структурной схемой может быть изменен режим регулирования СТАТКОМ (регулирование напряжения в точке присоединения или режим регулирования РМ), заданы параметры регуляторов и уставки по напряжению в точке присоединения, РМ и напряжению на стороне выпрямленного напряжения СП.

3.4 Выводы

Разработанная структура микропроцессорного узла позволяет обеспечить все необходимые внутренние и внешние взаимодействия для обеспечения в реальном времени процессов моделирования, управления и наблюдения. Принятое распределение выполняемых функций внутри микропроцессорного узла между отдельными процессорами обеспечивает оптимальную загрузку всех процессоров, минимизацию информационных потоков за счет локализации вычислений и максимизацию производительности для высокоприоритетной процедуры ШИМ.

Разработанные на основе функциональных схем и математического описания принципиальные схемы сопроцессоров силового оборудования обеспечивают требуемый частотный диапазон 10 кГц адекватного воспроизведения процессов. Диапазон задаваемых параметров модели перекрывает диапазон параметров силового оборудования.

Специализированное программное обеспечение средств моделирования статического синхронного компенсатора реализует базовые алгоритмы системы автоматического управления, необходимые процедуры преобразования результатов оцифровки мгновенных значений сигналов модели и управление параметрами модели и состоянием ключей в реальном времени. Квантованная структура программы в процессоре АЦП и САУ и запас по его вычислительным ресурсам позволяет надстраивать систему автоматического управления, дополняя ее контурами регулирования

различных параметров, таких как регуляторы обратной и нулевой последовательности напряжения и др.

Погрешности широтно-импульсного модулирования трехфазного статического преобразователя определяемые аппаратными и программными особенностями реализации средств моделирования статического синхронного компенсатора не вызывают значимых отклонений от желаемого значения напряжения и, следовательно, не приводят к значительному снижению адекватности моделирования.

Таким образом, разработанные программно-технические средства моделирования СТАТКОМ обеспечивают адекватное всережимное бездекомпозиционное моделирование в реальном времени статических синхронных компенсаторов с учетом функционирования системы автоматического управления.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДСТВ ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАТКОМ

Проведенные экспериментальные исследования разработанных ПТС моделирования СТАТКОМ направлены на анализ адекватности моделирования процессов в СТАТКОМ и функционирования модели СТАТКОМ в составе модели ЭЭС во всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы.

Для определения технических характеристик ПТС моделирования СТАТКОМ и проверки адекватности моделирования процессов в СТАТКОМ исследования проводятся в автономном режиме, что позволяет абстрагироваться от свойств модели энергосистемы и упростить анализ результатов. Экспериментальные исследования в автономном режиме проводятся с рядом упрощений и допущений.

При исследовании режимов генерации/потребления мощности СТАТКОМ в четырех квадрантах предполагается, что трехфазное модельное напряжение эквивалентной сети симметрично и не содержит высших гармоник, а его амплитуда неизменна вне зависимости от характеристик нагрузки. Величина выпрямленного напряжения в ходе данного эксперимента остается неизменной.

При исследовании модели в различных режимах работы САУ реакция сети на изменение нагрузки и, в частности, на величину мощности генерируемой моделью СТАТКОМ воспроизводится с помощью упрощенной модели линии электропередач (ЛЭП). Модель ЛЭП представлена как линия с эквивалентными сосредоточенными параметрами сопротивления и индуктивности без учета взаимоиндукции и поперечной активной и емкостной проводимости. Один конец ЛЭП подключен к эквивалентной модели сети, а к другому концу подключена модель комплексной нагрузки и ПТС моделирования СТАТКОМ.

Для анализа адекватности моделирования СТАТКОМ в составе модели энергосистемы экспериментальные исследования проведены на базе модели сети электроснабжения разрабатываемого месторождения угля, выполненной по хоздоговору в рамках проекта «Энергокластер «Эльгауголь»». Результаты моделирования СТАТКОМ проанализированы в сравнении с результатами моделирования управляемых шунтирующих реакторов, установка которых планируется на подстанции (ПС) Эльгауголь в соответствии с техническим проектом. Схема сети электроснабжения приведена в приложении А.

Экспериментальные исследования проведены в нормальных и аномальных режимах работы сети в режиме поддержания на шинах ПС Эльгауголь заданного напряжения. В данной работе приведены результаты моделирования при плавном изменении в широких пределах нагрузки на ПС Промплощадка, при ступенчатом изменении нагрузки на шинах ПС Эльгауголь и при различной длительности короткого замыкания на выводах нагрузки на ПС Промплощадка (рис. 4.15).

4.1 Экспериментальные исследования программно-технических средств моделирования СТАТКОМ в автономном режиме работы

В автономном режиме экспериментальные исследование ПТС моделирования СТАТКОМ проведены в статических и динамических режимах работы. При исследовании в статических режимах проверяется возможность работы СП в установившихся режимах генерации/потребления активной/реактивной мощности, то есть возможность работы во всех четырех квадрантах, проверяется соответствие устанавливаемых режимов выражению (1.1) для расчета потребляемой мощности в зависимости от уровней трехфазных напряжений сети и СП.

Экспериментальные исследования ПТС моделирования СТАТКОМ проведены при следующих условиях и упрощениях:

- 1) напряжение сети синусоидальное, симметричное и не зависит от нагрузки;
- 2) в модели силового оборудования заданы симметричные по трем фазам и по плечам СП параметры;
- 3) цепь выпрямленного напряжения замещена двумя идеальными источниками напряжения с одинаковыми параметрами.

Схема эксперимента представлена на рисунке 4.1.

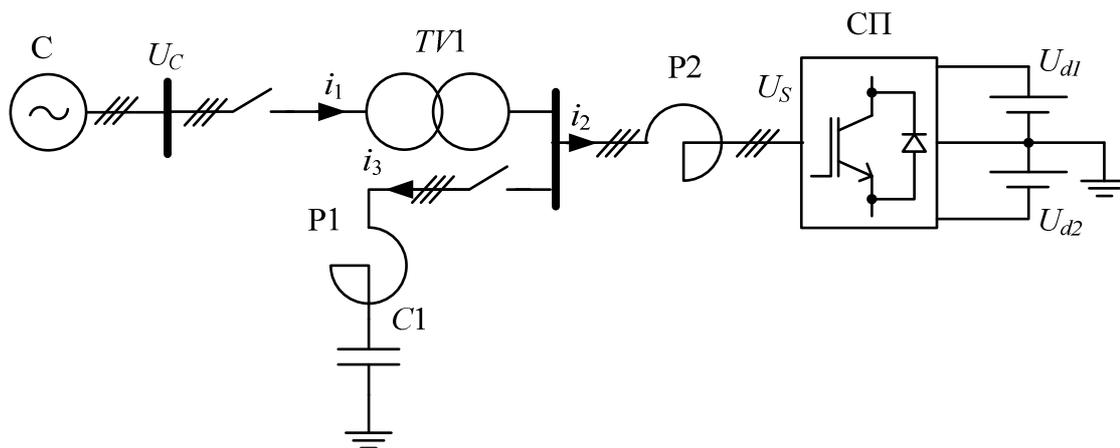


Рис. 4.1. Схема экспериментальных исследований ПТС моделирования СТАТКОМ в статических режимах работы

Напряжения источников на стороне выпрямленного напряжения U_{di} на 40 % превышает амплитуду напряжения сети U_C с учетом приведения через коэффициент трансформации к одному классу напряжений. Фильтр настроен на подавление токов несущей частоту коммутации СП.

Установка режима проводилась замещением выходных значений САУ на значения ортогональных составляющих желаемого результирующего вектора напряжения СП U_S , представленных во вращающейся dq -системе координат. Ортогональные составляющие подвергались преобразованию из dq -системы координат в АВС с последующим применением алгоритмов обратного преобразования координат для осуществления ШИМ.

Полученные для некоторых фиксированных значений амплитуды вектора напряжения СП статические диаграммы мощности приведены на

рисунке 4.2. Пунктирной линией на рисунке 4.2 изображена диаграмма мощности, рассчитанная по выражению (1.1)

$$S = 3 \frac{U_C U_S}{X_{LS}} \sin(\alpha) - j3 \left(\frac{U_C U_S}{X_{LS}} \cos(\alpha) - \frac{U_C^2}{X_{LS}} \right) = P - jQ. \quad (1.1)$$

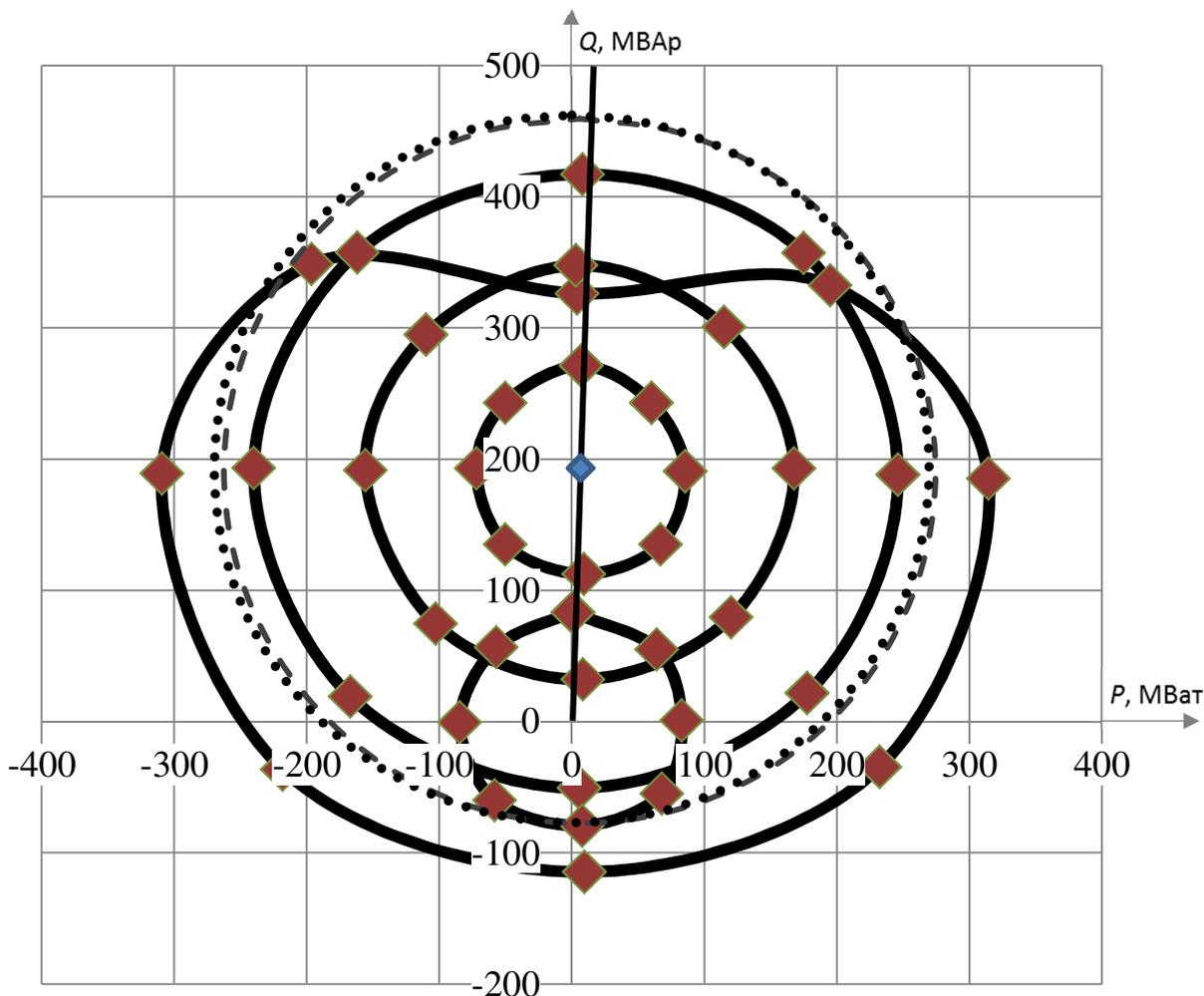


Рис. 4.2. Диаграммы мощности потребляемой СП из сети

Диаграммы мощности имеют формы окружностей с общим центром, который определяет мощность короткого замыкания выводов вторичной обмотки трансформатора на землю. Характеристика с наибольшим радиусом соответствует предельному значению задаваемой амплитуды напряжения на стороне переменного тока СП, то есть при формировании трехфазного напряжения близкого к прямоугольной форме. Этот режим сопровождается генерацией высших гармоник (3, 5, 7, 9...), искажающих форму напряжения в энергосистеме (рисунок 4.3). Штриховой линией обозначен предельный уровень для заданного напряжения на стороне переменного тока СП, при

котором не происходит подобной генерации высших гармоник, то есть при амплитудном значении желаемого напряжения не превышающем значения выпрямленного напряжения. Уменьшение задаваемого напряжения приводит к линейно зависимому уменьшению радиуса характеристики. Угол наклона прямой, соединяющей начало координат и центр окружностей диаграмм мощности, к оси активной мощности определяет относительный уровень активных потерь в СТАТКОМ [107].

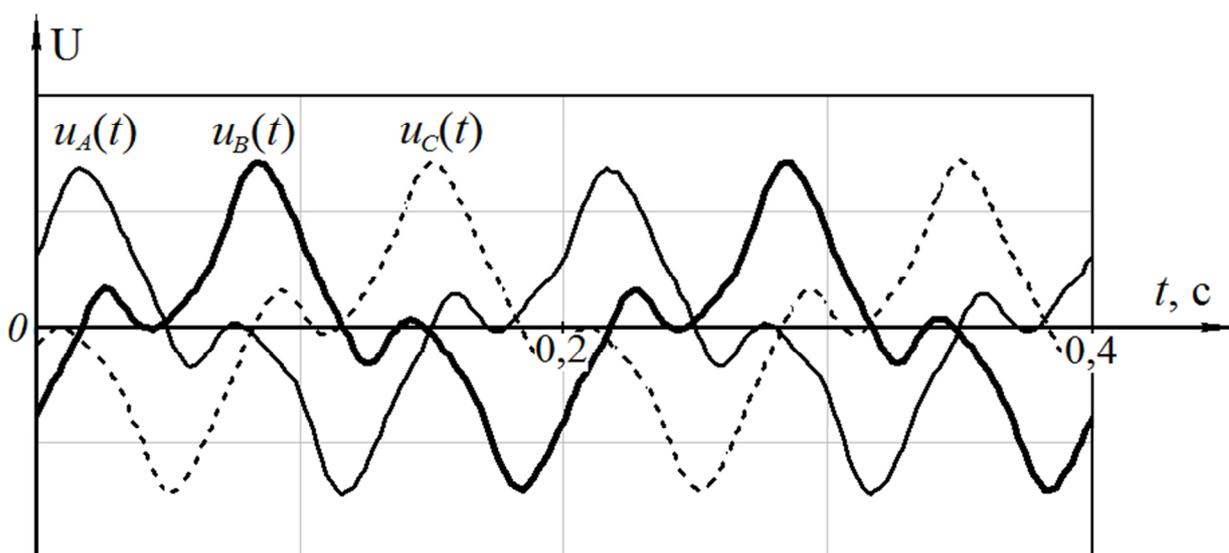


Рис. 4.3. Мгновенные значения напряжений в точке присоединения СТАТКОМ при формировании СП напряжения прямоугольной формы

Полученные на экспериментальном образце устройства моделирования СТАТКОМ осциллограммы напряжения, токов, полной, реактивной и активной мощностей представлены на рисунках 4.4, 4.5.

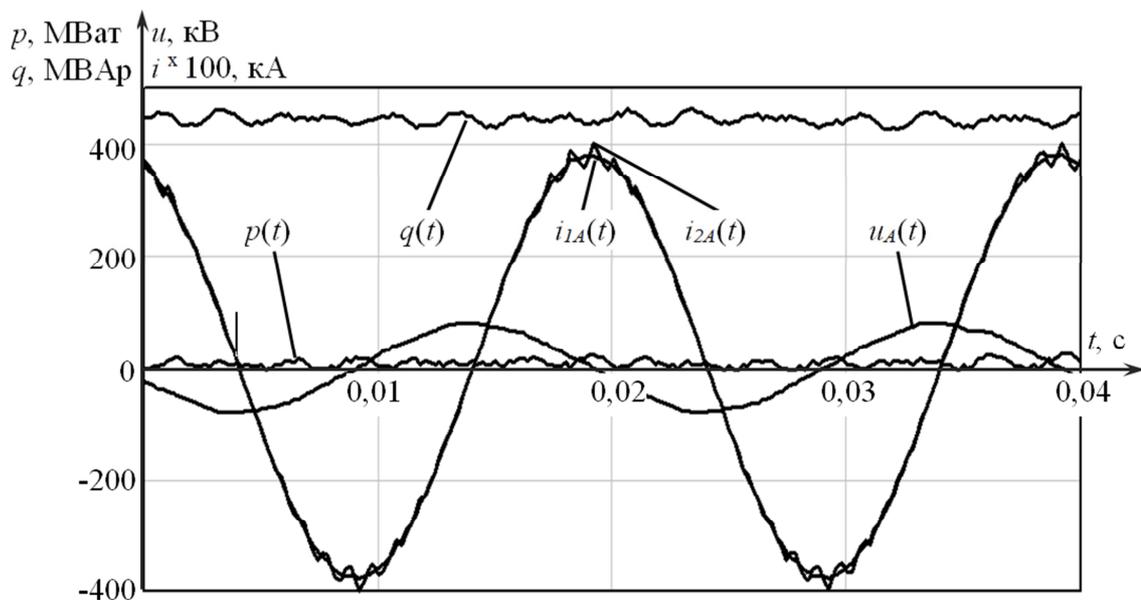


Рис. 4.4. Осциллограммы сигналов ПТС моделирования СТАТКОМ в режиме потребления РМ

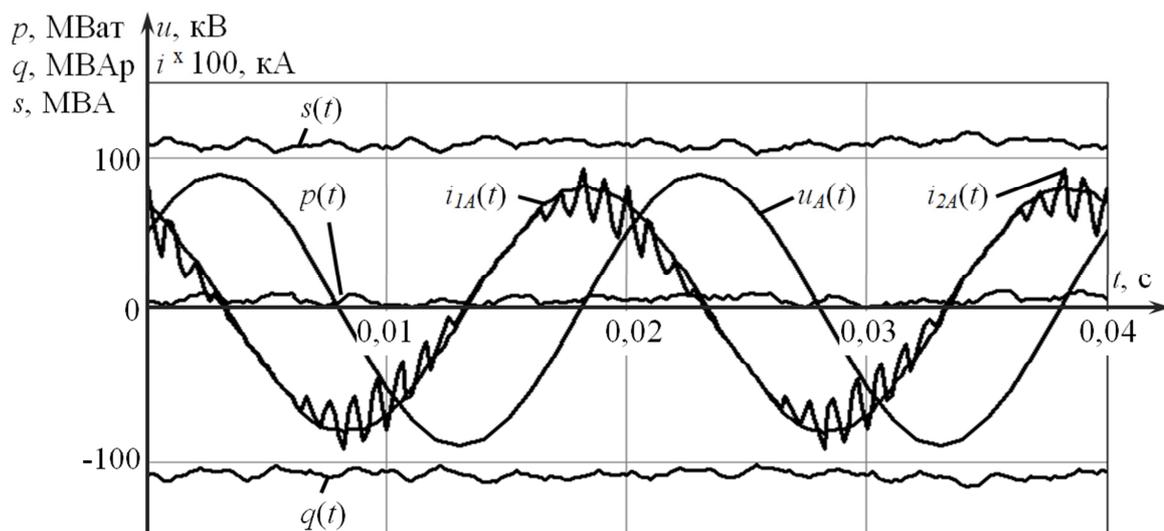


Рис. 4.5. Осциллограммы сигналов ПТС моделирования СТАТКОМ в режиме генерации РМ

На рисунках 4.3–4.5 приняты обозначения: $s(t)$, $p(t)$, $q(t)$ – сигналы полной, активной и реактивной мощностей СТАТКОМ; $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$ – сигналы фазных напряжений в точке присоединения; $i_{1A}(t)$, $i_{2A}(t)$ – сигналы тока трансформатора и СТАТКОМ полученные на ПТС моделирования СТАТКОМ.

Диаграмма мощности, полученная в результате анализа рисунка 4.2 и иллюстрирующая режимы работы СП в ПТС моделирования СТАТКОМ и

принцип управления режимом, представлена на рисунке 4.6. В соответствии с нагрузочной способностью оборудования СТАТКОМ и СП, определяемой производителем, могут быть выделены области допустимой непрерывной работы и области допустимой кратковременной работы, которые могут быть смоделированы с помощью разработанных ПТС моделирования.

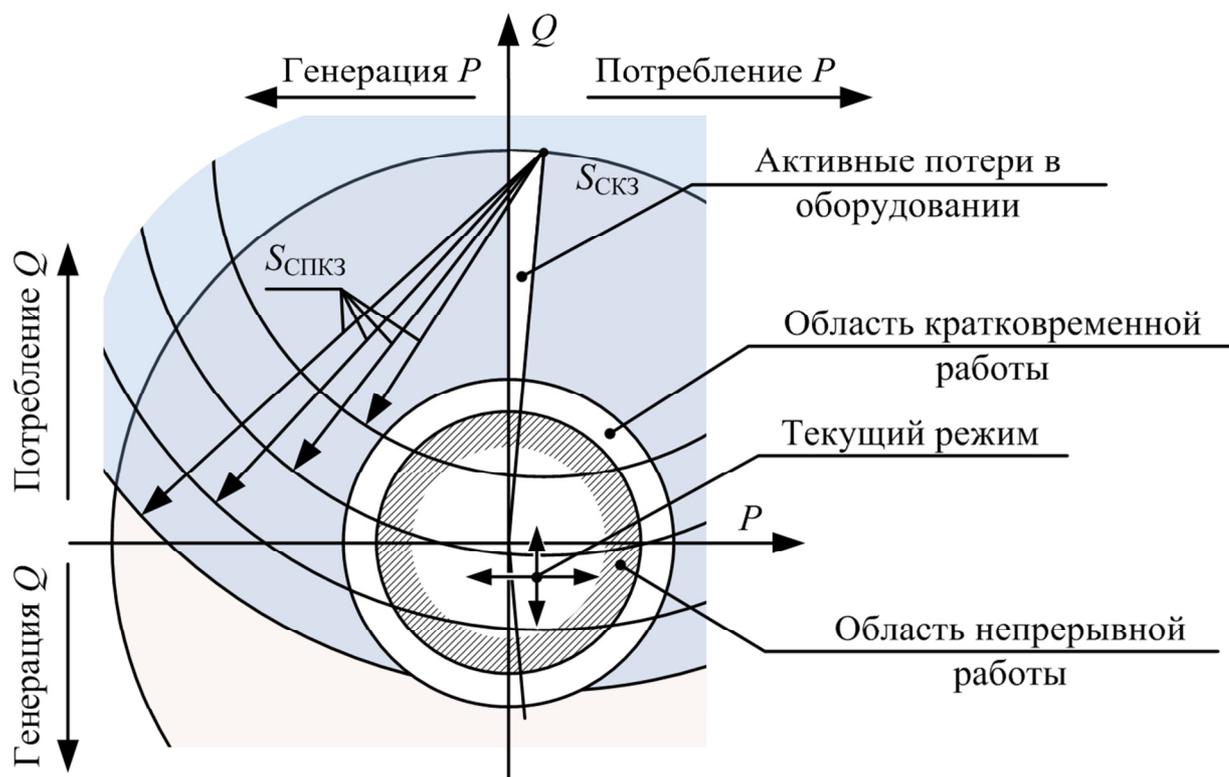


Рис. 4.6. Режимы работы СП в устройстве FACTS

При нулевом выпрямленном напряжении на СП в устройстве возникают токи, соответствующие токам трехфазного КЗ, при этом полная потребляемая мощность соответствует точке $S_{СКЗ}$. Увеличивая выпрямленное напряжение и управляя амплитудой и фазой напряжения СП можно получить все режимы генерации/потребления активной и РМ. При нулевом напряжении сети полная мощность потребляемая СТАТКОМ соответствует $S_{СПКЗ}$.

Переход из текущего режима осуществляется изменением заданного значения напряжения по оси d – для изменения РМ, а по оси q – для изменения активной.

Полученные диаграммы и осциллограммы соответствуют ожидаемым и подтверждают способность ПТС моделирования СТАТКОМ адекватно воспроизводить всевозможные нормальные, аварийные и послеаварийные режимы работы, при этом динамические свойства ПТС моделирования СТАТКОМ будут определяться заложенными алгоритмами САУ.

Разработанное ПО содержит алгоритмы САУ СТАТКОМ (2.3), позволяющие регулировать напряжение на конденсаторной батарее, РМ СТАТКОМ и напряжение в точке присоединения СТАТКОМ по заданным уставкам. Для проверки динамических характеристик, которые способны реализовать ПТС моделирования СТАТКОМ проведены экспериментальные исследования в составе трехфазной модели небольшого участка сети. Схема эксперимента представлена на рисунке 4.7.

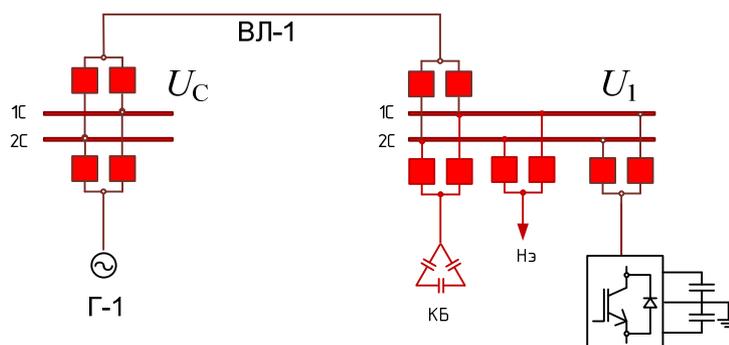


Рис. 4.7. Схема эксперимента

В схеме эксперимента модель генератора Г-1 работает в режиме моделирования шины бесконечной мощности [ссылка на инструкцию], и автоматически регулирует напряжение в точке его присоединения. Модель линии электропередач ВЛ-1 учитывает распределенные продольные параметры индуктивности и активного сопротивления как сосредоточенные и не учитывает поперечные параметры. Модель СТАТКОМ и модели трехфазной нагрузки (КБ и статическая реактивная нагрузка (Нэ)), соединена с генератором Г-1 через линию ВЛ-1.

При исследовании производится анализ динамических и статических характеристик ПТС моделирования СТАТКОМ с точки зрения возможности

моделирования существующих и разрабатываемых алгоритмов управления СТАТКОМ. Кроме того проверяется правильность функционирования и настройки регуляторов базовой структуры САУ.

Регуляторы контуров регулирования выпрямленного напряжения и РМ независимы и имеют одинаковую структуру (пропорционально-интегральную), поэтому достаточно произвести проверку работы только на одном из них. Так как контур регулирования РМ является внутренним для контура регулирования напряжения в точке присоединения, то исследование его характеристик обязательно перед исследованием контура регулирования напряжения.

Для исследования характеристик контура регулирования РМ производится задание ступенчато изменяемой уставки из режима максимально допустимой генерации в режим максимально допустимого потребления РМ и обратно. Сформированное в результате значение на выходе регулятора РМ соответствует ортогональной составляющей вектора напряжения по оси d . Уставка РМ, выходной сигнал регулятора РМ, а также сигнал напряжение фазы А после преобразования в систему координат АВС, представлены на рисунке 4.8.

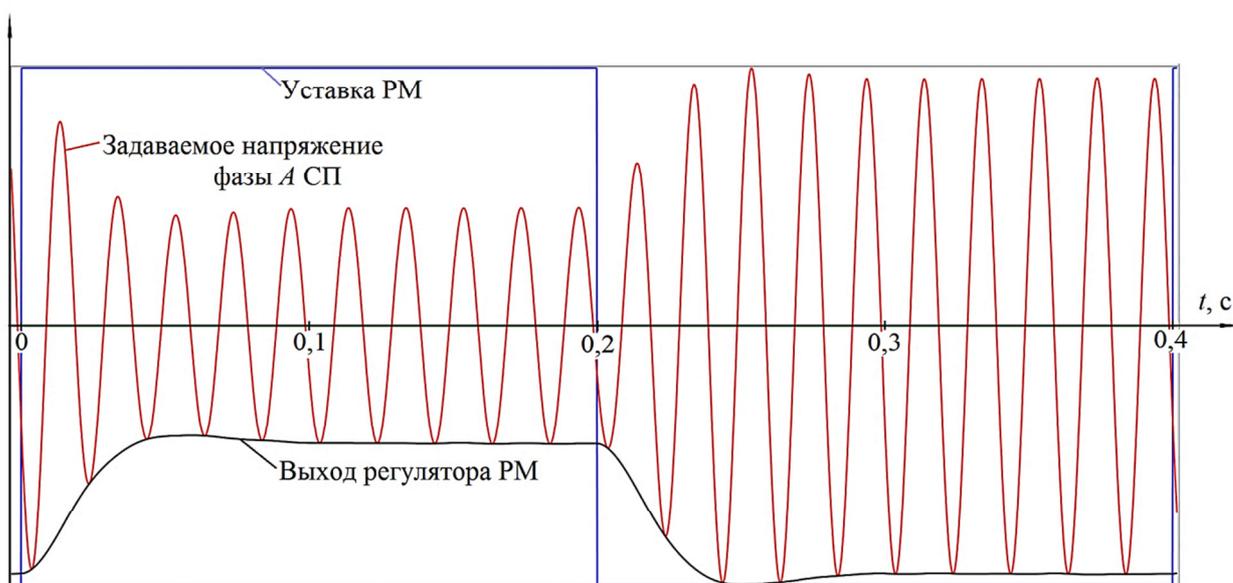


Рис. 4.8. Сигналы в контуре регулирования РМ

Минимальное время регулирования, полученное при различных настройках регулятора РМ, составляет 2 периода сетевой частоты, что позволяет адекватно моделировать существующие СТАТКОМ. При доработке САУ можно снизить минимальное время регулирования, что позволит адекватно воспроизводить функционирование СТАТКОМ с новыми алгоритмами САУ и тестировать САУ с помощью ПТС моделирования СТАТКОМ. Программная реализация САУ выполнена правильно, так как перерегулирование не превышает 5%, что соответствует выполненной настройке регулятора РМ на модульный оптимум.

Оценка правильности работы контура регулирования РМ, произведена по осциллограммам мощностей, приведенным на рисунке 4.9.

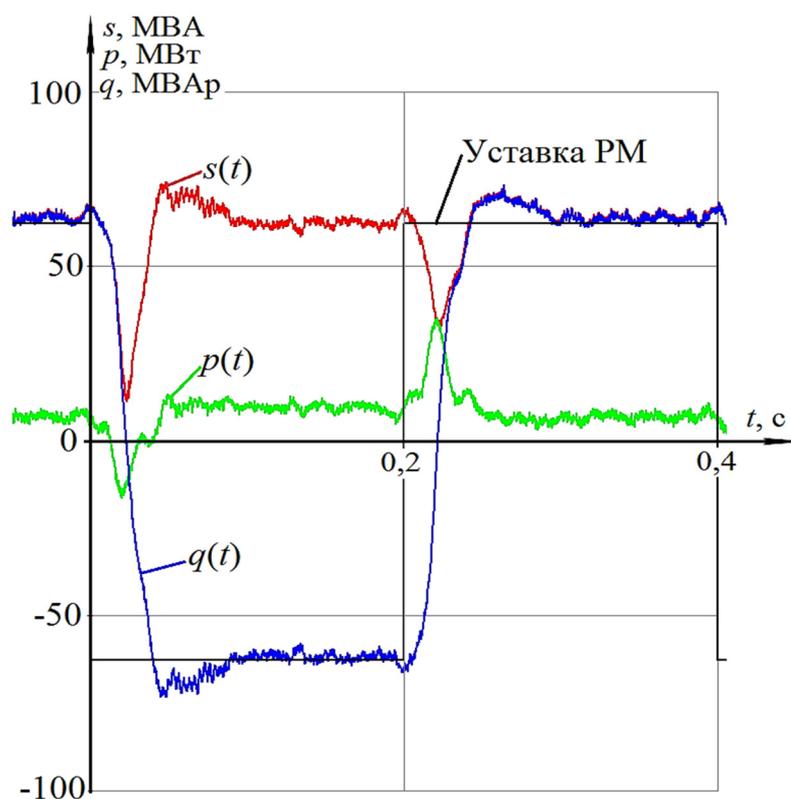


Рис. 4.9. Переходный процесс при реверсе РМ

Осциллограмма РМ подтверждает адекватность работы контура регулирования и ПТС моделирования СТАТКОМ в целом, поскольку потребление и генерация РМ соответствуют уставкам.

Осциллограммы трехфазных токов и напряжений в точке присоединения СТАТКОМ и на стороне трехфазного напряжения СП при реверсе РМ показаны на рисунке 4.10. Поскольку потребление РМ вызывает снижение напряжения в точке присоединения, то ток в режиме потребления больше чем в режиме генерации РМ.

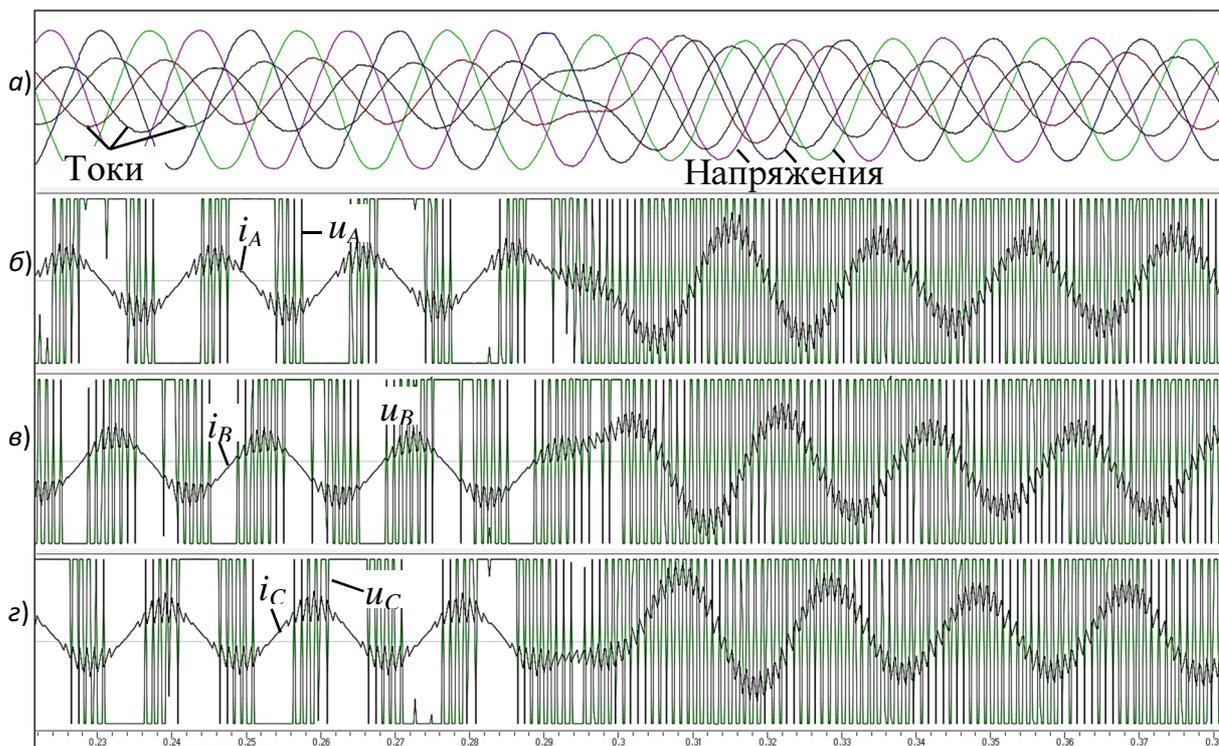


Рис. 4.10. Осциллограммы мгновенных значений фазных токов и напряжений
 а) в точке присоединения; б) фазы А СП; в) фазы В СП; г) фазы С СП.

Полученные результаты исследований подтверждают правильность работы ПТС моделирования СТАТКОМ в режиме регулирования РМ, поэтому можно провести исследование работы в режиме регулирования напряжения в точке присоединения.

Для проверки работы регулятора напряжения на вход контура регулирования напряжения в точке присоединения задается ступенчато изменяемая уставка. Экспериментальные исследования показали, что в установившемся режиме напряжение в точке присоединения СТАТКОМ U_1 равно уставке напряжения, если не достигнут предел регулирования РМ, в противном случае ошибка регулирования напряжения становится отличной от нуля. На рисунке 4.11 изображены осциллограмм напряжения СТАТКОМ

и ошибка регулирования, а на рисунке 4.12 – мощности СТАТКОМ и генератора.

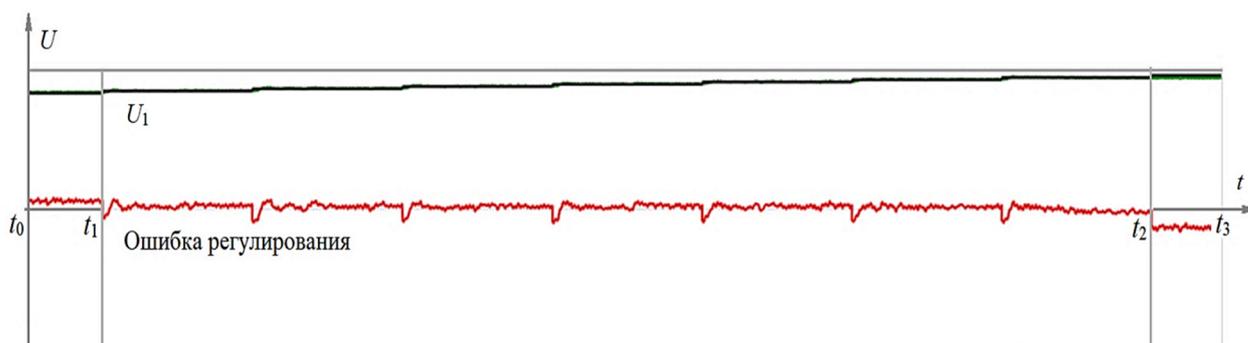


Рис. 4.11. Осциллограммы регулирования напряжения в точке присоединения СТАТКОМ

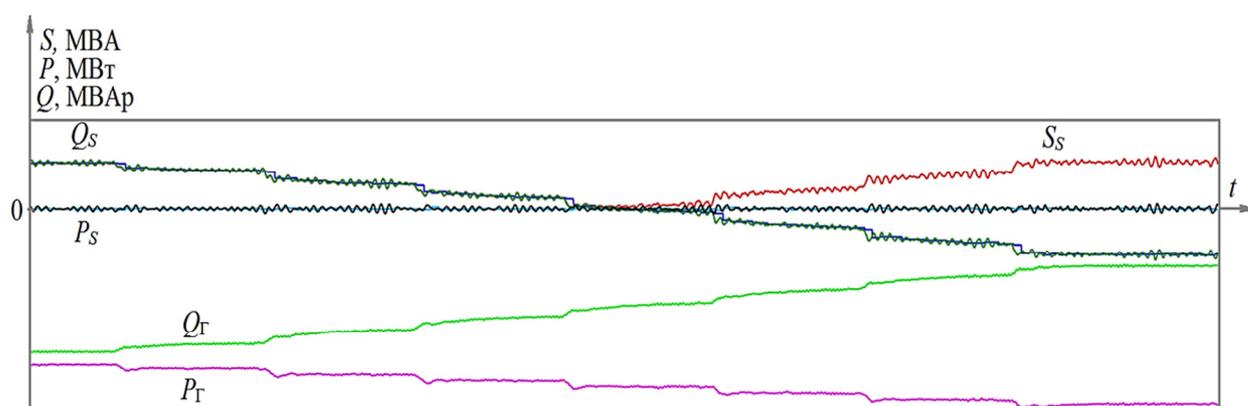


Рис. 4.12. Осциллограммы мощностей при регулировании напряжения в точке присоединения СТАТКОМ

Ошибка регулирования на интервале времени t_1-t_2 практически равна нулю в установившихся режимах, а РМ находится в пределах допустимых значений. На интервалах времени t_0-t_1 и t_2-t_3 уровень потребления/генерации РМ достигает максимально допустимого значения и ошибка регулирования перестает обрабатываться регулятором РМ. Работу регуляторов САУ СТАТКОМ отражают осциллограммы, приведенные на рисунке 4.13, 4.14 для регулятора напряжения в точке присоединения СТАТКОМ и регулятора РМ соответственно.



Рис. 4.13. Сигналы регулятора напряжения

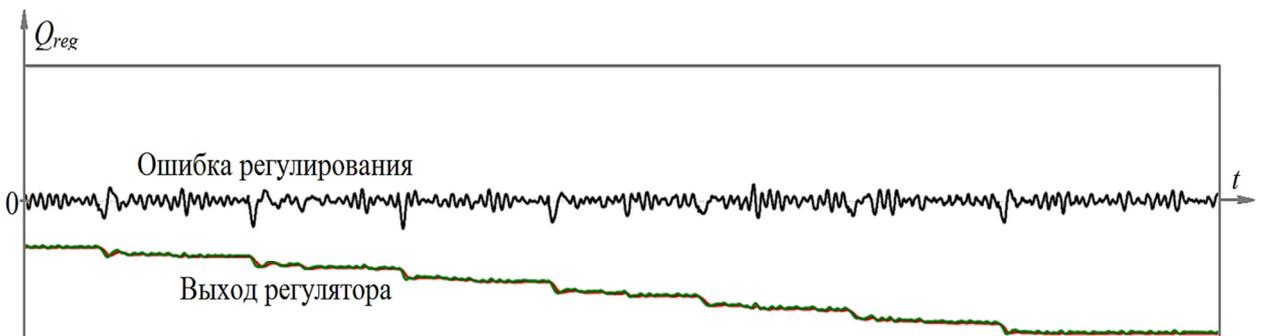


Рис. 4.14. Сигналы регулятора РМ

Анализ осциллограмм (рис. 4.11–4.14) показал, что контур регулирования напряжения в точке присоединения СТАТКОМ без статической ошибки обрабатывает ступенчатое управляющее воздействие и медленно изменяющееся возмущающее воздействие со стороны генератора Г-1, при условии достаточности пределов регулирования РМ.

Выводы:

Разработанные ПТС моделирования СТАТКОМ позволяют непрерывно в реальном времени осуществлять бездекомпозиционное моделирование процессов в силовом оборудовании установки СТАТКОМ с учетом действия САУ.

ПТС моделирования СТАТКОМ способны воспроизводить всевозможные нормальные, аварийные и послеаварийные режимы работы, протекание которых будет зависеть от параметров оборудования, САУ и релейной защиты СТАТКОМ.

Система автоматического управления, содержащая базовые алгоритмы, может работать в режиме с обратной связью по регулируемым параметра или без нее, что позволяет осуществлять задание желаемого

вектора напряжения СП или обеспечивать регулирование по заданной уставке РМ либо напряжения в точке присоединения.

ПТС моделирования СТАТКОМ позволяют обеспечить динамические характеристики реальных установок СТАТКОМ путем настройки регуляторов, что позволяет адекватно исследовать влияние СТАТКОМ на режим работы оборудования и ЭЭС в целом.

Если амплитуда задаваемого трехфазного напряжения СП больше напряжения на выпрямленной стороне, то в сеть трансформируется несинусоидальный сигнал, содержащий спектр нечетных гармоник напряжения (3, 5, 7, 9, 11).

4.2 Экспериментальные исследования программно-технических средств моделирования СТАТКОМ в составе модели ЭЭС

Необходимость моделирования СТАТКОМ в составе ЭЭС связана с решением задач разработки САУ СТАТКОМ, способной обеспечивать его оптимальное функционирование во всевозможных режимах работы сети либо с обеспечением адекватной реальным установкам функционирование при всевозможных режимах работы сети, для исследования влияния СТАТКОМ на протекание процессов в энергосистеме.

Для подтверждения адекватности работы ПТС моделирования СТАТКОМ в составе модели ЭЭС, исследования проводится на модели сети электроснабжения разрабатываемого месторождения угля. Согласно проекту Энергокластер «Эльгауголь» находится в составе ОЭС Востока [ссылка на журнал РЗА].

Исходная схема модели энергокластера «Эльгауголь», приведенная в приложении А, и частичная схема, представленная на рисунке 4.15, содержат управляемые шунтирующие реакторы РТУ-100000/220-УХЛ1 и УШР-25000/110 и батареи статических конденсаторов (БСК) в качестве средств компенсации реактивной мощности (СКРМ), используемых для

управления режимом работы энергокластера. В проекте реактор мощностью 100 МВАр планируется установить на ПС Призейская, через которую осуществляется питание энергокластер, а два реактора по 25 МВАр – на ПС Эльгауголь [ссылка на отчет по Эльгауглю].

Ввиду того, что основная нагрузка энергокластера сконцентрирована на ПС Промплощадка и ПС Горная, которые получают электроэнергию по высоковольтным линиям электропередач от шин 110 кВ ПС Эльгаугль, СТАТКОМ будет наиболее эффективно функционировать при его присоединении к шинам 110 кВ ПС Эльгаугль. По результатам экспериментов должно быть произведено сравнение режимов работы без управляемых устройств компенсации РМ, с УШР и БСК или со СТАТКОМ на ПС Эльгауголь.

Локальное управление УШР осуществляется САУ со следующими основными функциями:

- 1) стабилизация напряжения в точке присоединения;
- 2) управление степенью загрузки УШР по РМ.

Управление БСК осуществляет автоматическая система управления режимом (АСУР) ПС Эльгауголь.

Система управления СТАТКОМ реализует следующие режимы регулирования:

- 1) стабилизация напряжение в точке присоединения;
- 2) регулирование РМ по заданной уставке;

Из списка тестовых случаев согласно программе и методика исследовательских испытаний средств моделирования УШР и БСК можно выделить тесты актуальные для проведения экспериментальных исследований ПТС моделирования СТАТКОМ в составе ЭЭС:

1. Поддержание заданных напряжений с помощью СКРМ при непрерывном изменении нагрузок;
2. Поддержание заданных напряжений при коммутациях ЛЭП;
3. Поддержание заданных напряжений при набросе и сбросе нагрузки;

4. Регулирование напряжения при выходе значения напряжения за пределы регулирования АСУР ПС;

5. Определение предельно допустимой частоты изменения уставок АСУР ПС.

6. Определение предельно допустимой скорости изменения нагрузок, при которой АСУР ПС может поддерживать заданное напряжения.

Поскольку динамические свойства УШР и СТАТКОМ различаются на порядок, то вместо случаев под пунктами 5 и 6 следует провести испытания в динамическом режиме.

Экспериментальные исследования ПТС моделирования СТАТКОМ проведены по списку тестовых случаев:

1. Исследования ПТС моделирования СТАТКОМ в нормальных и аномальных режимах работы модели сети в статических режимах.

1.1. Поддержание заданного напряжения при непрерывном изменении нагрузки.

1.2. Поддержание заданного напряжения при набросе и сбросе нагрузки.

1.3. Поддержание заданного напряжения при выходе значения напряжения за пределы регулирования.

2. Короткое замыкание на нагрузке с последующим ее отключением

Краткое описание схемы СТАТКОМ и места его присоединения

При проведении экспериментальных исследований модель СТАТКОМ подключена к шинам 110 кВ на ПС Эльгауголь, к тем же шинам подключены ЛЭП до ПС Промплощадка и ПС Горная.

Исходя из схемы сети электроснабжения СТАТКОМ будет оказывать максимальное влияние на режим работы оборудования подстанций Горная и Промплощадка. Существенное влияние СТАТКОМ также окажет на работу оборудования на ПС Ундыткан. По мере удаления от ПС Эльгауголь в сторону электростанций (Зейская ГЭС, Нерюнгринская ГРЭС) влияние на

режим работы нагрузки будет снижаться. Однако в случае отключения линии ПС А – ПС Призейская или ПС Б – ПС Призейская электроснабжение нагрузки ПС А или ПС Б соответственно будет осуществляться через ПС Эльгауголь, что усилит влияние СТАТКОМ на указанные подстанции.

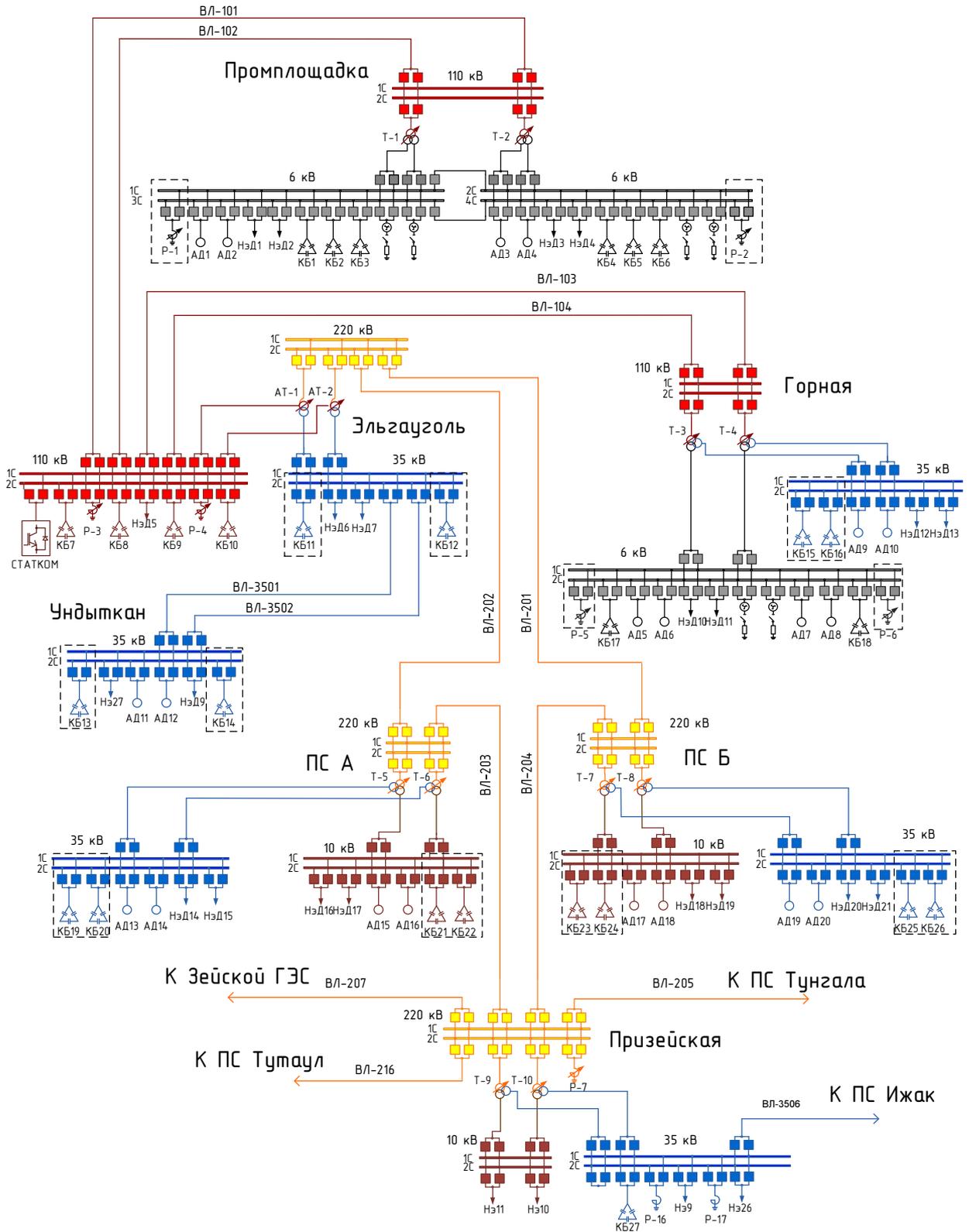


Рис. 4.15. Схема участка сети энергокластера «Эльгауголь»

Схема установки СТАТКОМ приведена на рисунке 4.16.

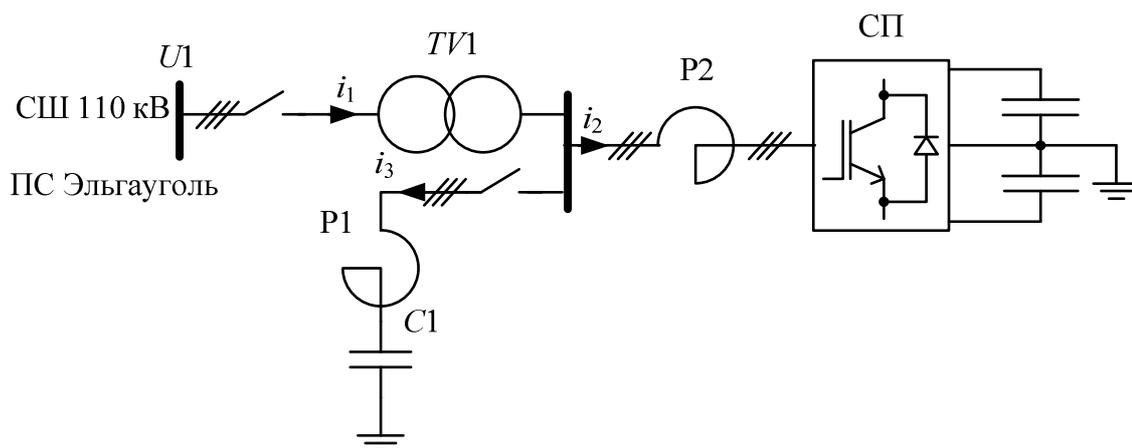


Рис. 4.16. Схема присоединения СТАТКОМ в эксперименте

Определение параметров оборудования СТАТКОМ

В модели энергокластера «Эльгауголь» на шины 110 кВ ПС «Эльгауголь» предполагается установить СТАТКОМ. Установленная модельная мощность СТАТКОМ составляет 60 МВАр.

Для подключения СТАТКОМ к шинам ВН выбирается трансформатор ТДЦТН-80000/110. Параметры трансформаторов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Тип ТР	S_n , МВА	$U_{ВН}$, кВ	$U_{СН}$, кВ	$U_{НН}$, кВ	ΔP_x , кВт	ΔQ_x , кВАр	I_{XX} , %	ΔP_k , кВт	$U_{КВС}$, %	$U_{КВН}$, %	$U_{КСН}$, %
ТДЦТН- 80000/110	80	115	11	6,6	64	480	0,6	365	10,5	17	6,5

При выборе параметров устанавливаемого оборудования за основу взята установка СТАТКОМ, на ПС «Выборгская». Параметры устанавливаемого оборудования приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Наименование	Значение
Индуктивность сглаживающего реактора	3,15, мГн
Емкость конденсаторных батарей	1120, мкФ
Емкость конденсаторов фильтра	24,06, мкФ

Индуктивность реактора фильтра	0,4, мГн
Сопротивление резистора фильтра	43,6, Ом

Результаты проверки ПТС моделирования СТАТКОМ, подтверждающие правильность установки параметров выбранного оборудования приведены на рисунках 4.17, 4.18.

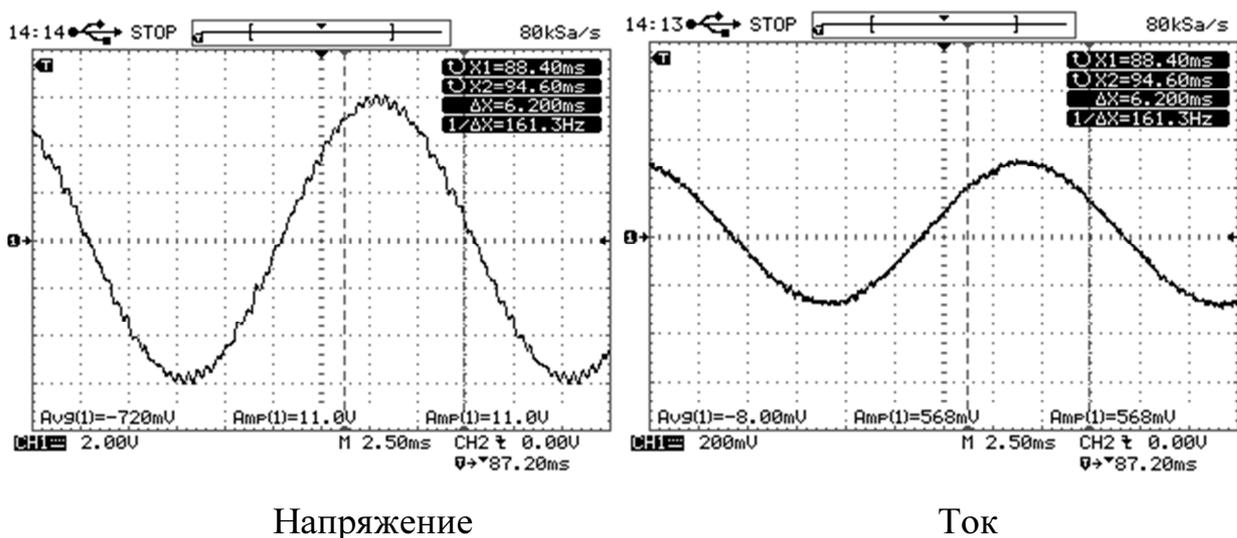


Рис. 4.17. Осциллограммы напряжения и тока фазы в обмотке ВН ТВ1

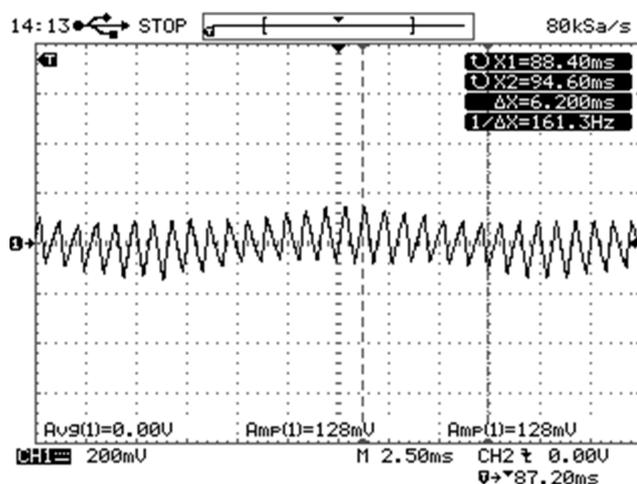


Рис. 4.18. Осциллограмма тока фильтра

4.2.1 Экспериментальные исследования в режиме поддержания напряжения при непрерывном изменении нагрузки

В рассматриваемых режимах работы уставка напряжения на шине 110 кВ ПС Эльгауголь составляла 120 кВ. Ограничения выдачи/потребления РМ СТАТКОМ установлены на уровне 60 МВАр.

Сценарии режимов идентичны для ЭЭС со СТАТКОМ, с УШР и без управляемых СКРМ на ПС Эльгауголь:

1. Установка параметров САУ;
2. Пауза 60 с для завершения переходных процессов;
3. Плавное линейное уменьшение нагрузки асинхронного двигателя АД-1 на ПС Промплощадка с уровня 2,3 МВт до 1,35 МВт;
4. Пауза 300 с;
5. Плавное линейное увеличение нагрузки асинхронного двигателя АД-1 на ПС Промплощадка с уровня 1,35 МВт до 2,9 МВт;
6. Пауза 100 с.

Результаты исследований без установки устройств управляемых СКРМ на ПС Эльгауголь в виде осциллограмм приведены на рисунках 4.19–4.21.

Как видно из осциллограмм изменение нагрузки в установленном диапазоне приводит к значительному отклонению напряжения от номинального значения в нарушение требований ГОСТ Р 54149-2010 [15]. Кроме того ввиду увеличения мощности нагрузки АД-1 снижается уровень напряжения на шинах 6,3 кВ до уровня недостаточного для создания вращающего момента равного моменту нагрузки, вследствие чего происходит останов двигателя. Связанный с этим рост потребляемой РМ вызывает резкое снижение напряжения на шинах и последующий останов присоединенных к этим шинам асинхронных двигателей.

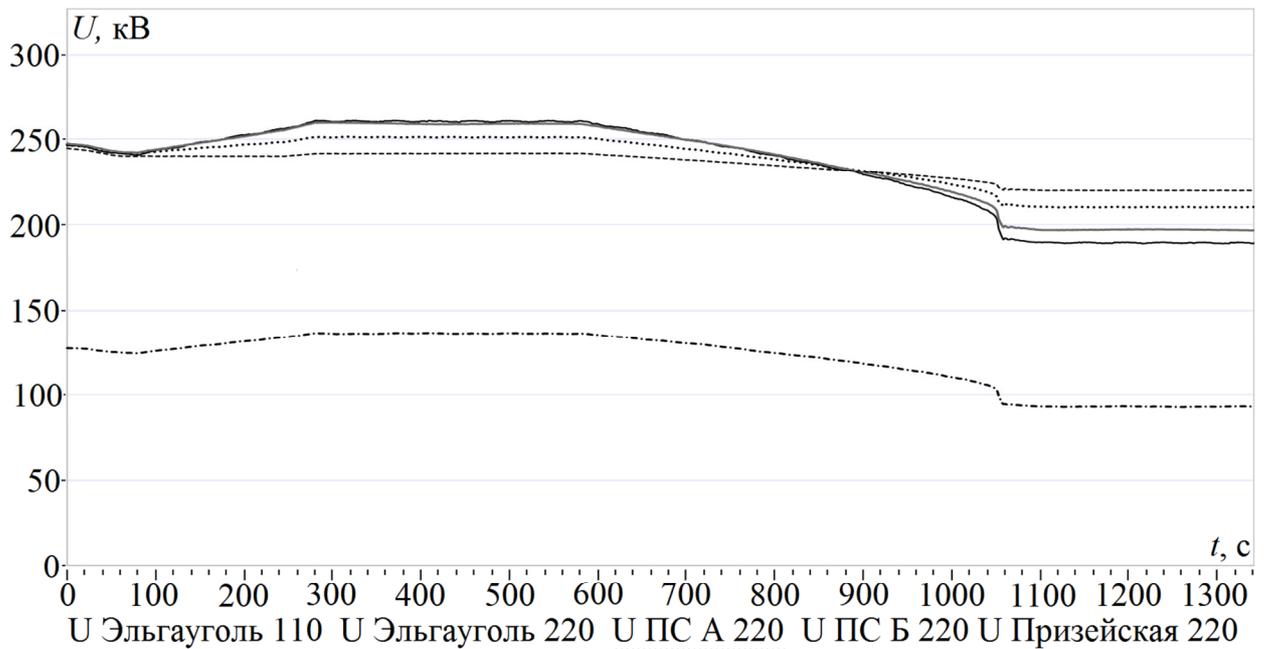


Рис. 4.19. Напряжения на шинах 110 и 220 кВ

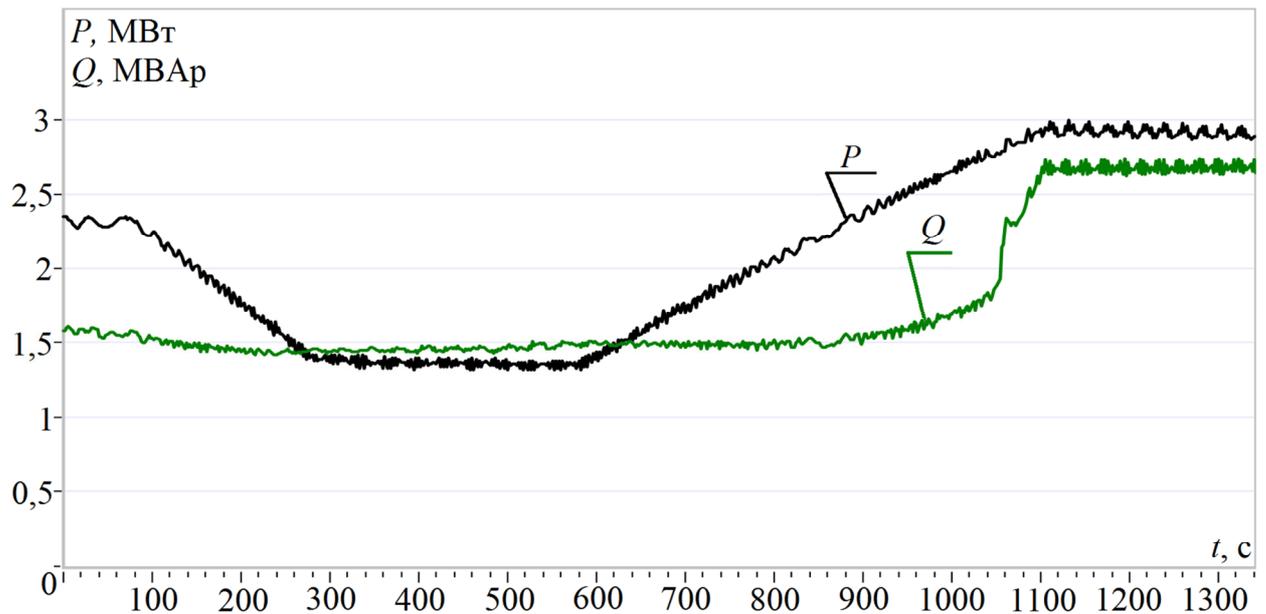


Рис. 4.20. График изменения нагрузки АД-1

Для автоматического регулирования напряжения на шине 110 кВ ПС Эльгауголь по проекту планируется установка двух УШР. Результаты исследования работы энергокластера с УШР и БСК приведены на рисунках 4.21–4.24.

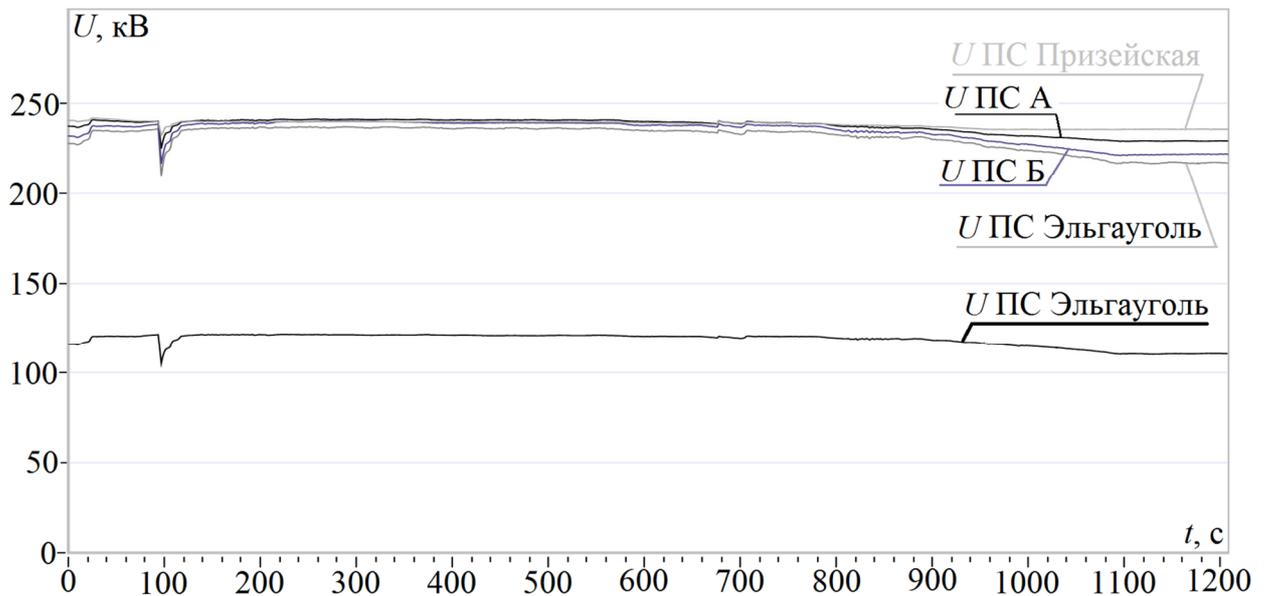


Рис. 4.21. Напряжения на шинах 110 и 220 кВ

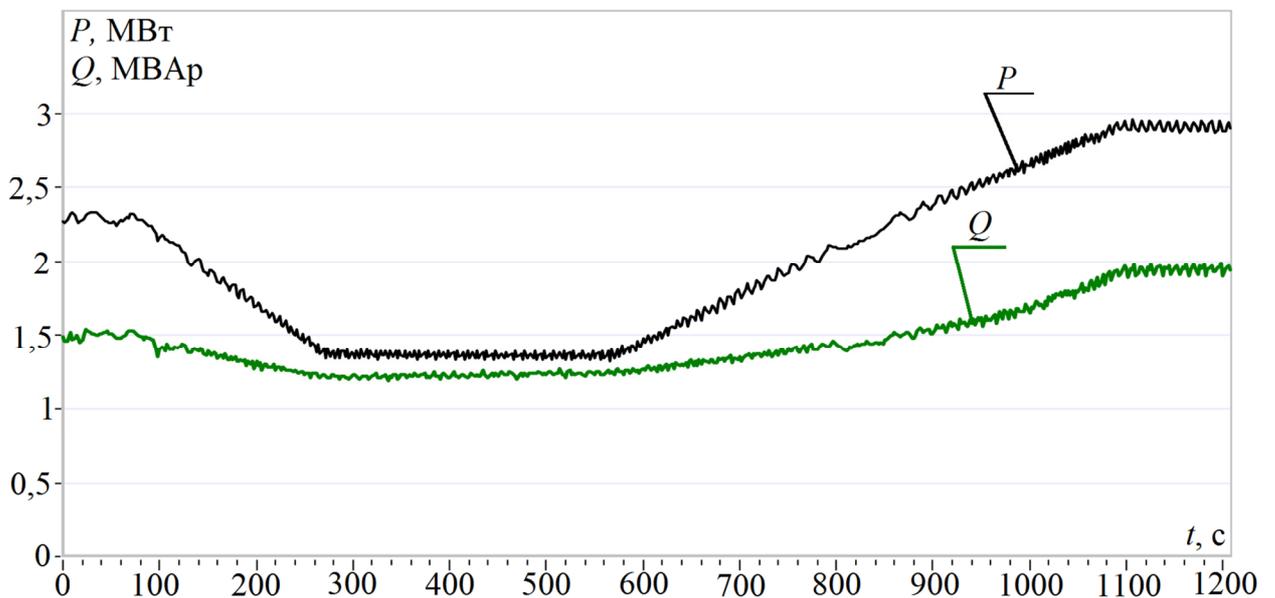


Рис. 4.22. График изменения нагрузки АД-1

Установка УШР и БСК на ПС Эльгауголь позволила снизить отклонения напряжений и сохранить их в диапазоне предельно допустимых значений у потребителя. В режиме минимальной нагрузки установившееся значение напряжения на ПС Эльгауголь соответствуют уставке, при максимальной нагрузке УШР выходят на предел регулирования, поэтому напряжение на шинах 110 кВ ПС Эльгауголь имеет отличное от уставки значение.

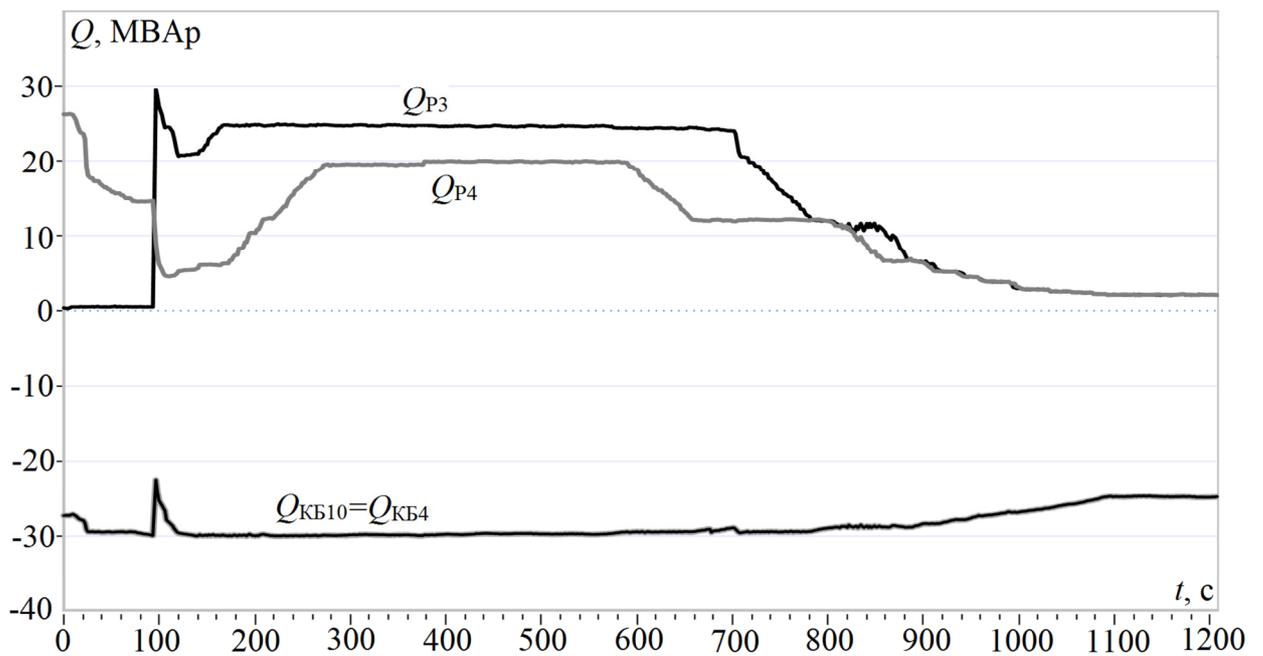


Рис. 4.23. Мощности СКРМ ПС Эльгауголь 110

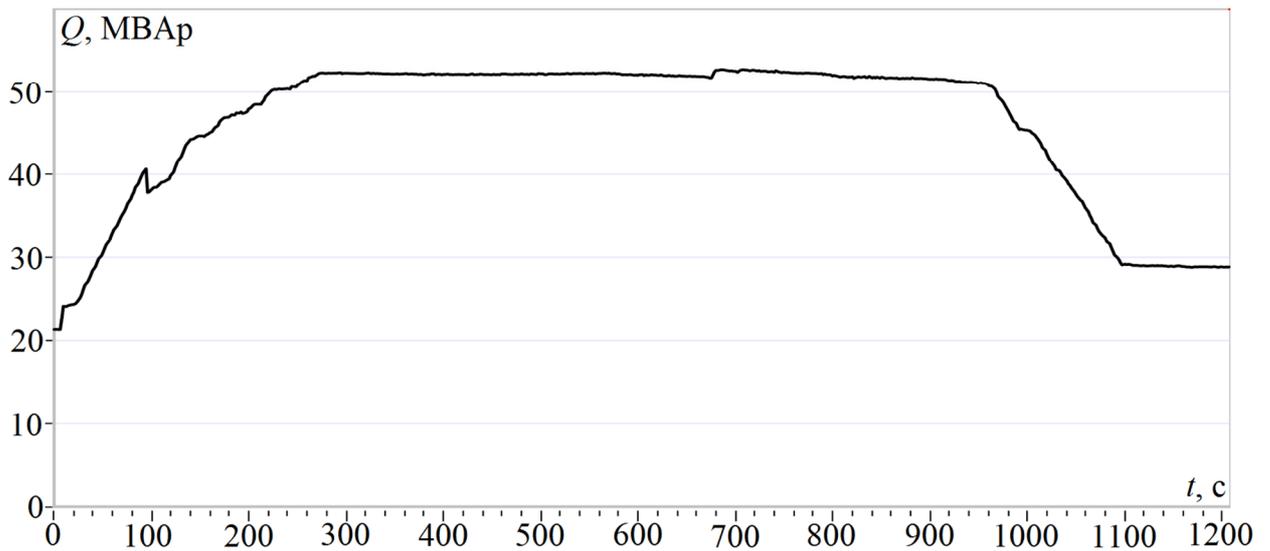


Рис. 4.24. График регулирования мощности УШР на ПС Призейская

Установка СТАТКОМ мощностью 60 МВАр должна не только увеличить диапазон потребляемой РМ, но и обеспечить ее генерацию, при снижении напряжения. Результаты исследований режима работы энергокластера Эльгауголь с моделируемым СТАТКОМ приведены на рисунках 4.25–4.27.

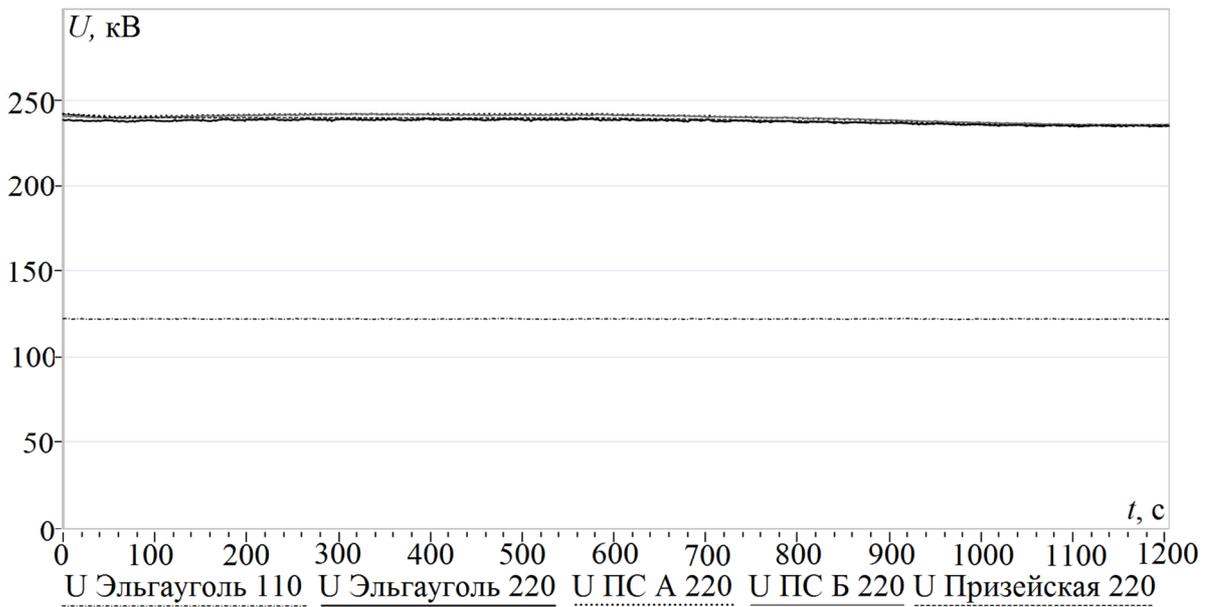


Рис. 4.25. Напряжения на шинах 110 и 220 кВ

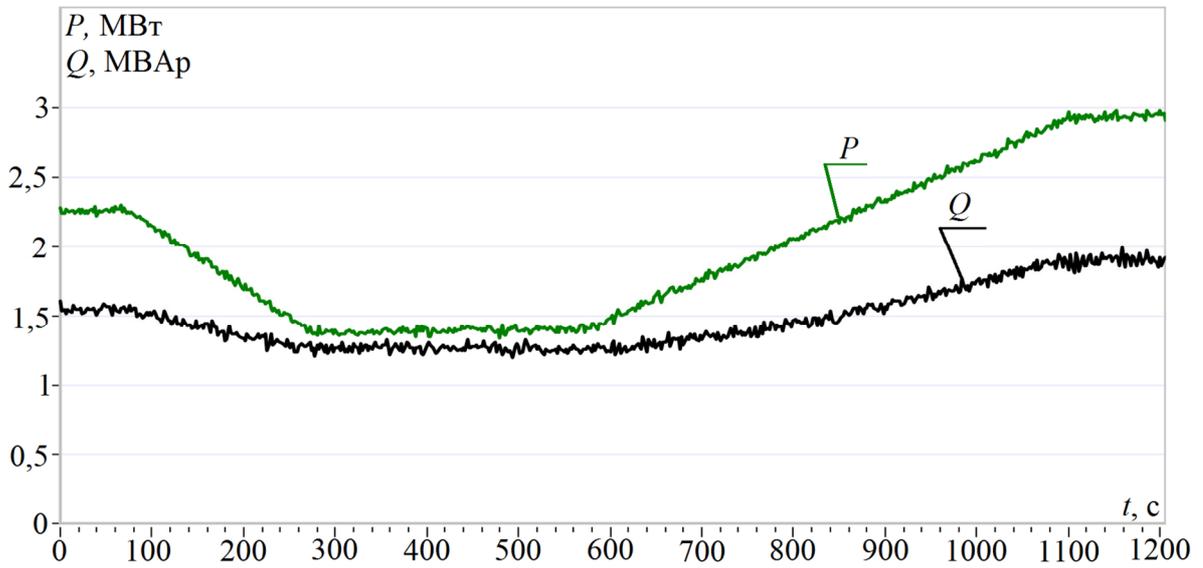


Рис. 4.26. Мощности переменной нагрузки АД-1

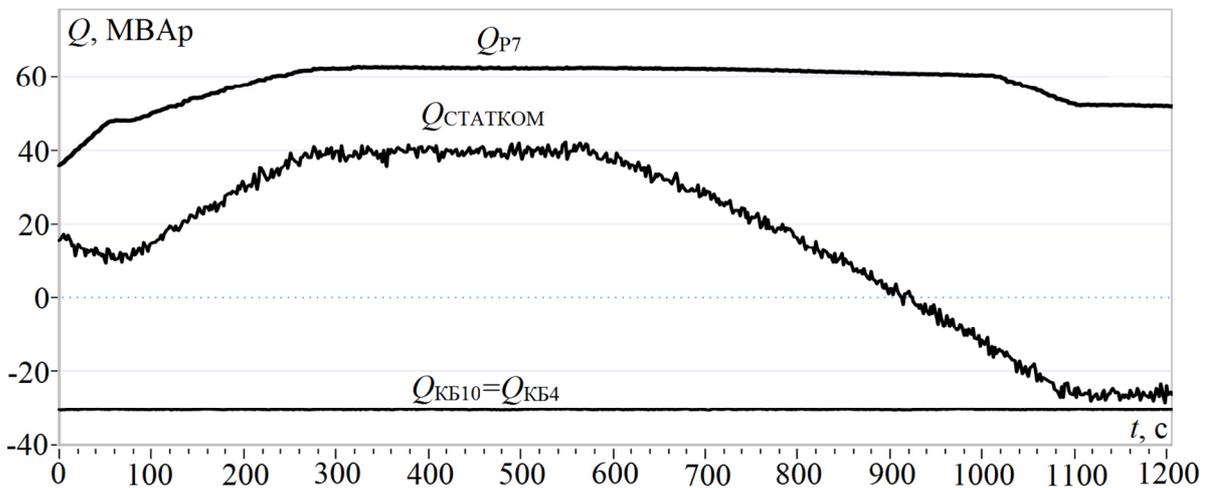


Рис. 4.27. Мощности СКРМ на ПС Эльгауголь и ПС Призейская

Анализ осциллограмм напряжений показывает, что ПТС моделирования СТАТКОМ способны поддерживать напряжение при непрерывном изменении нагрузки в допустимых по РМ пределах, как и УШР с БСК, но с большим быстродействием. Кроме того СТАТКОМ заменяет совокупность УШР и БСК и обеспечивает плавно регулируемое повышение и понижение напряжения. Это приводит к значительному улучшению качества напряжения и на нагрузке, питаемой через ПС Эльгауголь, и на нагрузке, питаемой от ПС Призейская.

4.2.2 Экспериментальные исследования в режиме поддержания напряжения при набросе и сбросе нагрузки

Ступенчатое изменение нагрузки осуществляется непосредственно на шинах 110 кВ ПС Эльгауголь с помощью модели динамической нагрузки НЭД-5 в точке присоединения СКРМ. Сценарии режимов идентичны для ЭЭС со СТАТКОМ, с УШР и без управляемых СКРМ на ПС Эльгауголь:

1. Установка параметров САУ;
2. Нагрузка НЭД-5 отключена;
3. Пауза 300 с;
4. Нагрузка НЭД-5 $X=90$ Ом, $G=0,02$ См;
5. Пауза 300 с;
6. Нагрузка НЭД-5 $X=19$ Ом, $G=0,099$ См;
7. Пауза 300 с;
8. Нагрузка НЭД-5 $X=90$ Ом, $G=0,02$ См;
9. Пауза 300 с;
10. Нагрузка НЭД-5 отключена;
11. Пауза 300 с.

Как и в случае с линейно изменяющейся нагрузкой при отсутствии устройств управляемой компенсации РМ не обеспечивается требуемый диапазон напряжения и устойчивая работа двигательной нагрузки.

Результаты моделирования сети электроснабжения с установленным УШР на ПС Эльгауголь представлены на рисунках 4.28–4.30, с установкой СТАТКОМ – на рисунках 4.31–4.32.

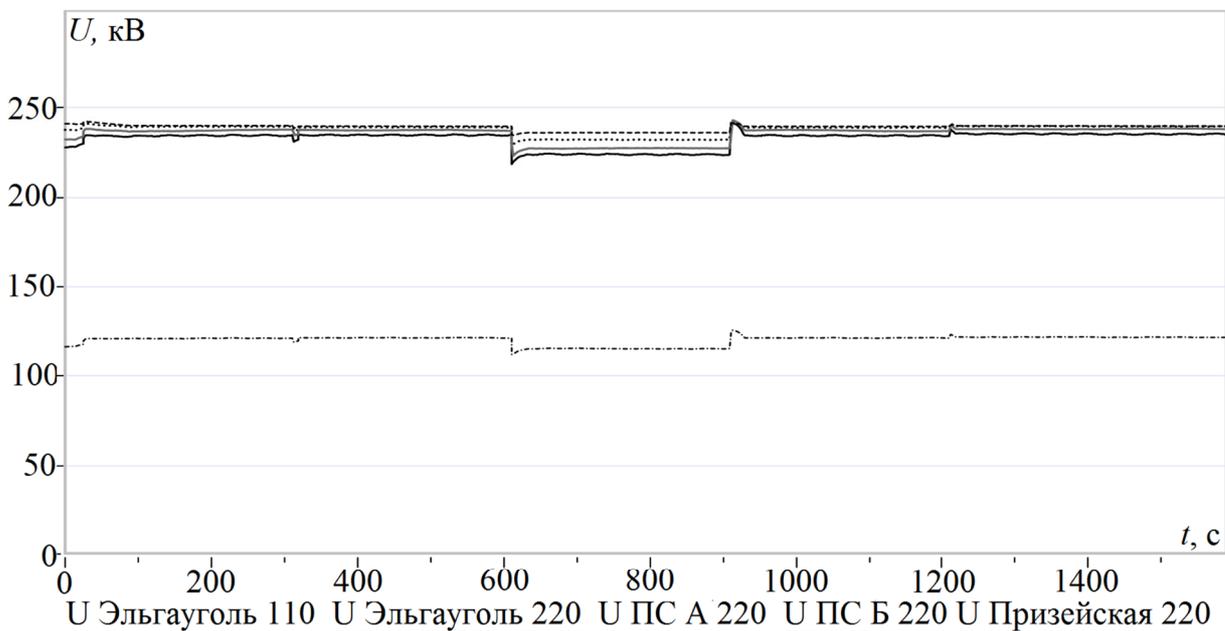


Рис. 4.28. Напряжения на шинах 110 и 220 кВ

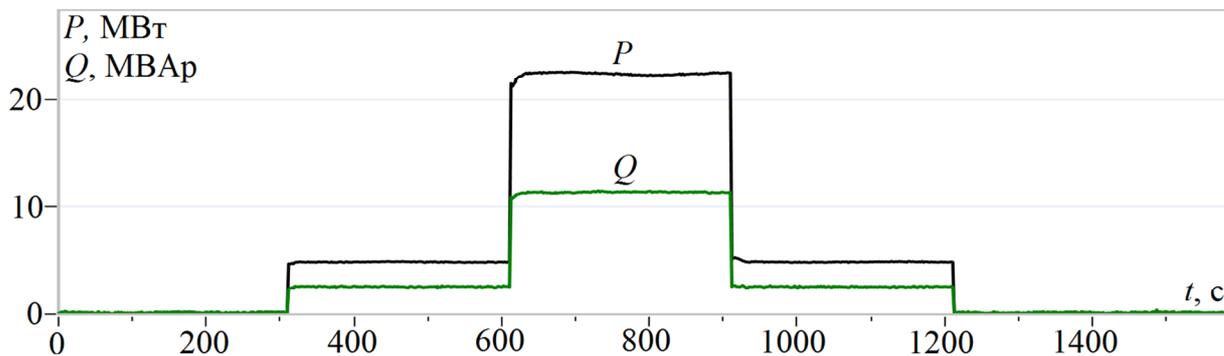


Рис. 4.29. Мощности нагрузки НеД-5

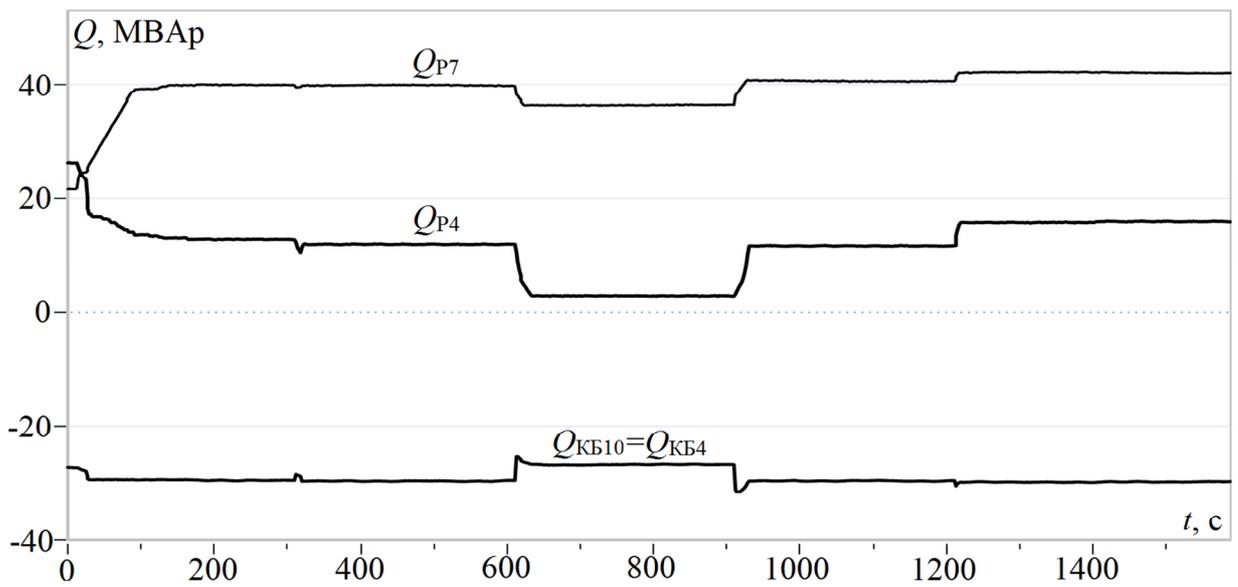


Рис. 4.30. Мощности СКРМ на ПС Эльгауголь и ПС Призейская

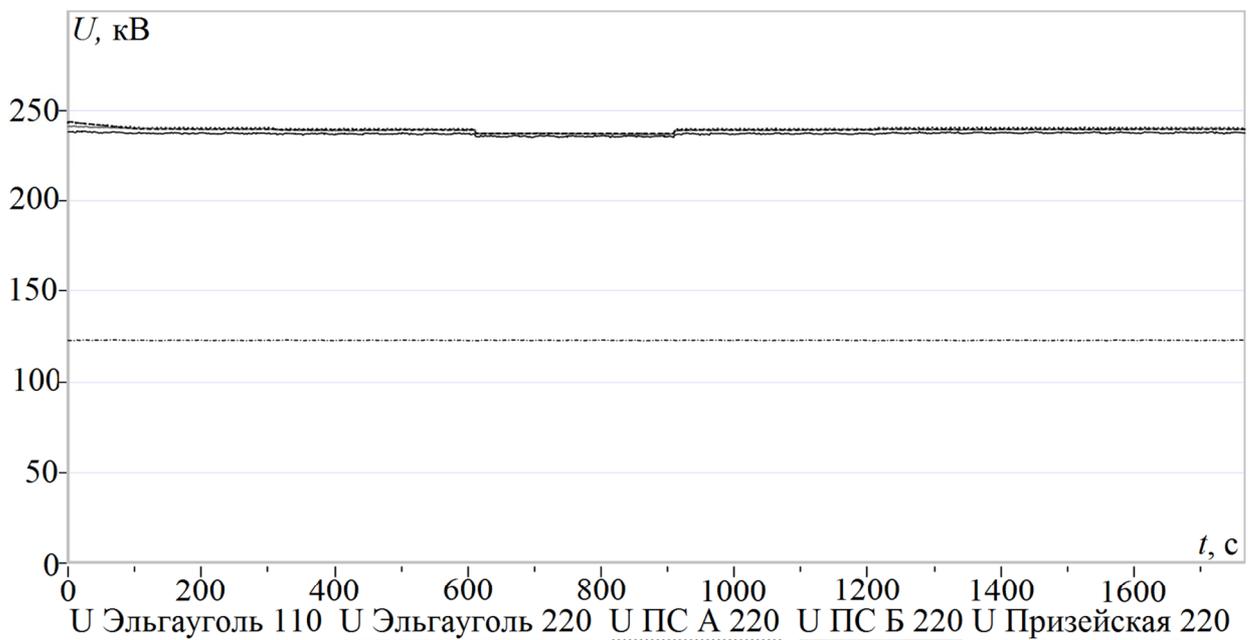


Рис. 4.31. Напряжения на шинах 110 и 220 кВ

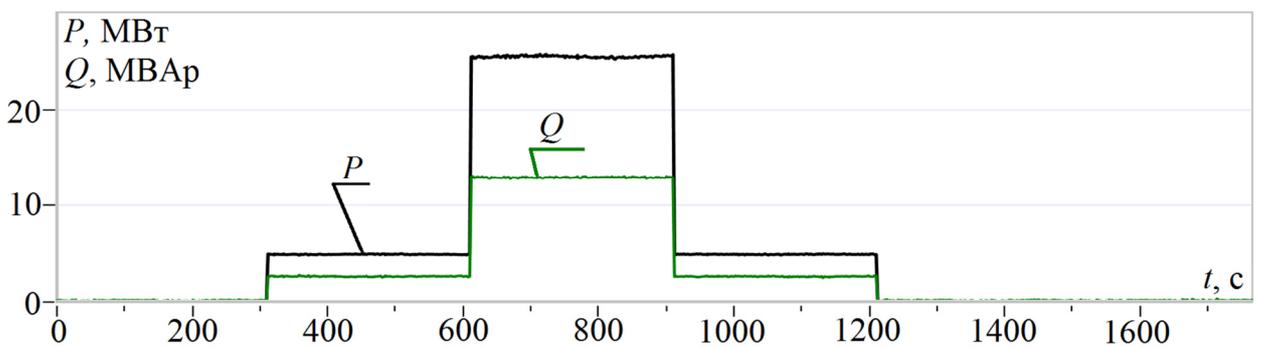


Рис. 4.32. Мощности нагрузки HeD-5

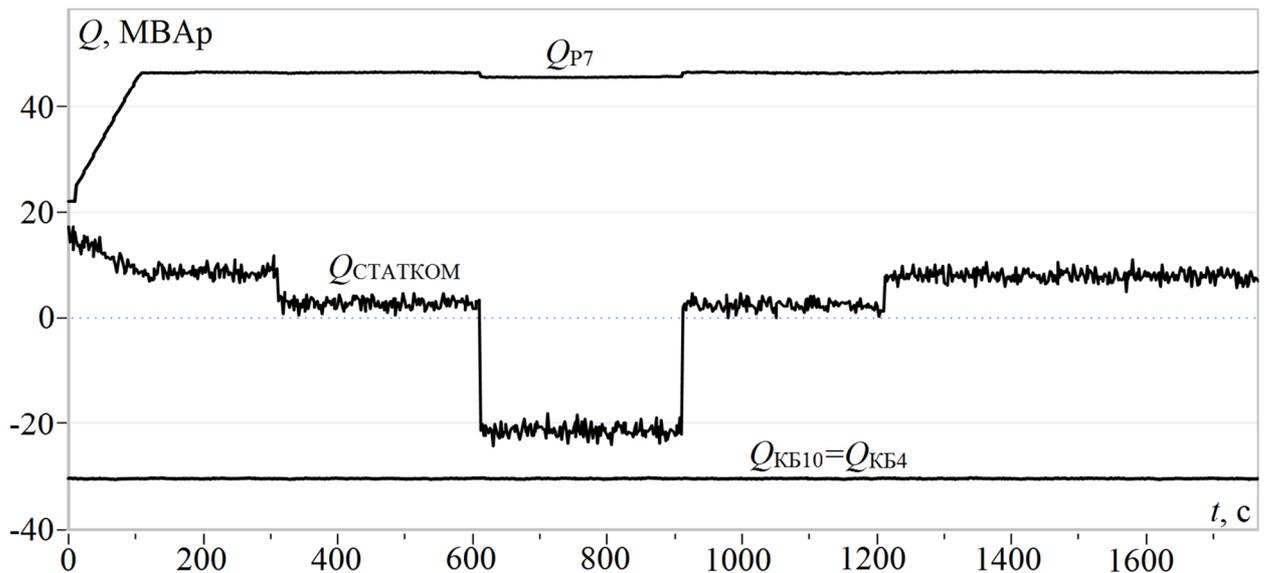


Рис. 4.33. Мощности СКРМ на ПС Эльгауголь и ПС Призейская

Результаты срезов напряжений на шинах подстанций энергокластера «Эльгауголь» приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Значения напряжений на шинах подстанциях при ступенчатом изменении нагрузки с установленными УШР и БСК на ПС Эльгауголь

Подстанции / шины		Время, с								
		250	314*	500	613*	750	914**	1000	1213**	1300
ПС Эльгауголь / 110 кВ	U, кВ	120,6	118,9 (-1,7)	121	111,3 (-9,7)	114,9	125,2 (10,3)	120,9	122,9 (2)	121,2
ПС Эльгауголь / 220 кВ		234,8	231,8	234,9	218,9	224,2	241,5	234,8	237,9	235,3
ПС А / 220 кВ		239,6	237,6	239,3	229,2	232,5	242,7	239	241,2	239,8
ПС Б / 220 кВ		237,3	234,9	237,8	222,6	227,8	243,2	237,4	240,4	238,3
ПС Призейская / 220 кВ		240,2	239	239,8	234,4	236,3	241,7	239,7	241	240

В таблице 4.1 в скобках указано изменение напряжения в моменты времени набросов и сбросов нагрузки; * – момент времени наброса нагрузки; ** – момент времени сброса нагрузки.

Таблица 4.2. Значения напряжений на шинах подстанциях при ступенчатом изменении нагрузки с установленным СТАТКОМ на ПС Эльгауголь

Подстанции / шины		Время, с				
		250	500	750	1000	1300
ПС Эльгауголь / 110 кВ	U, кВ	120,5	120,5	120,4	120,5	120,5
ПС Эльгауголь / 220 кВ		238	237,6	235,7	237,3	237,9
ПС А / 220 кВ		240,9	240,3	237,6	240,1	241
ПС Б / 220 кВ		240,2	239,8	237,5	239,6	240
ПС Призейская / 220 кВ		240,1	239,7	237,7	239,6	240,1

При использовании УШР на ПС Эльгауголь в момент наброса нагрузки происходит провал напряжения, возникшая ошибка по напряжению обрабатывается САУ УШР. Длительность провала зависит от величины изменения мощности нагрузки и в данном случае составляет несколько секунд, при условии достаточности мощности установки. При сбросе нагрузки возникает временное перенапряжение, длительность которого также составляет несколько секунд.

Использование СТАТКОМ на ПС Эльгауголь позволяет за счет большего быстродействия снизить как длительность провалов и перенапряжений, так и их величину. Поскольку время регулирования СТАТКОМ составляет несколько периодов сетевой частоты, то на осциллограмме статики, данные на которой обновляются раз в секунду, отследить провалы напряжения и перенапряжения невозможно.

Различия динамических свойств УШР и СТАТКОМ наиболее значительны в аварийном режиме.

4.2.3 Экспериментальные исследования в режиме короткого замыкания на нагрузке

Сценарий теста короткого замыкания на нагрузке одинаковый для случая с УШР, со СТАТКОМ и без управляемых устройств компенсации РМ на ПС Эльгауголь:

1. Установка параметров САУ;

2. Пауза 0,5 с;
3. 3-хфазное КЗ на землю в АД-1;
4. Ожидание времени срабатывания РЗ;
5. Отключение выключателей;
6. Пауза 3 с;

Результаты экспериментов приведены на рисунках 4.34–4.36 для времени отключения АД-1 от шин ПС Промплощадка 0,15 с, на рисунках 4.37–4.39 – 0,2 с.

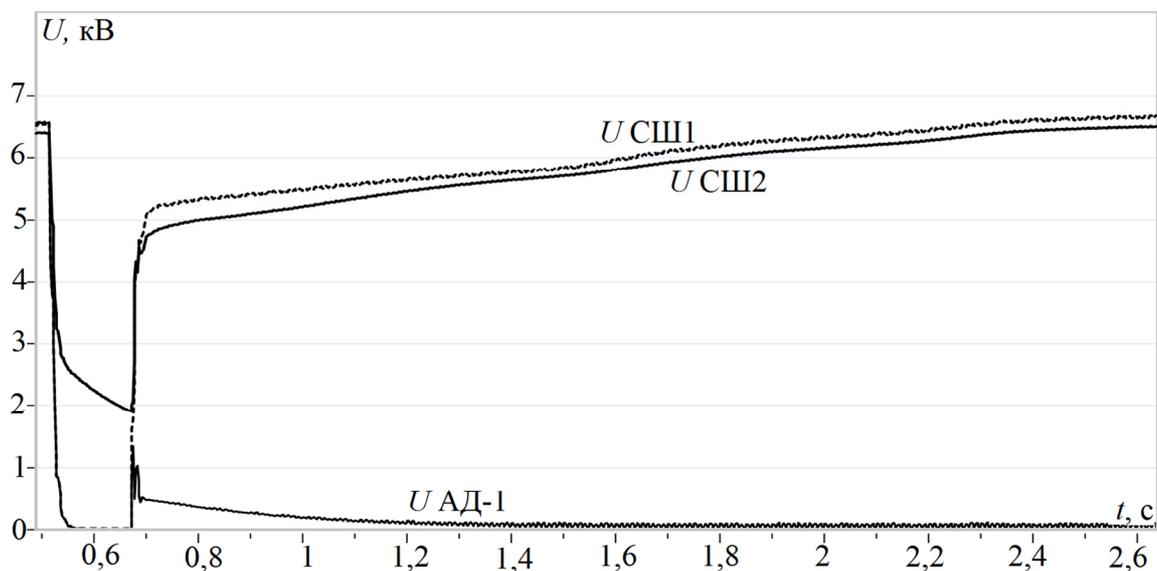


Рис. 4.34. Напряжения на ПС Промплощадка

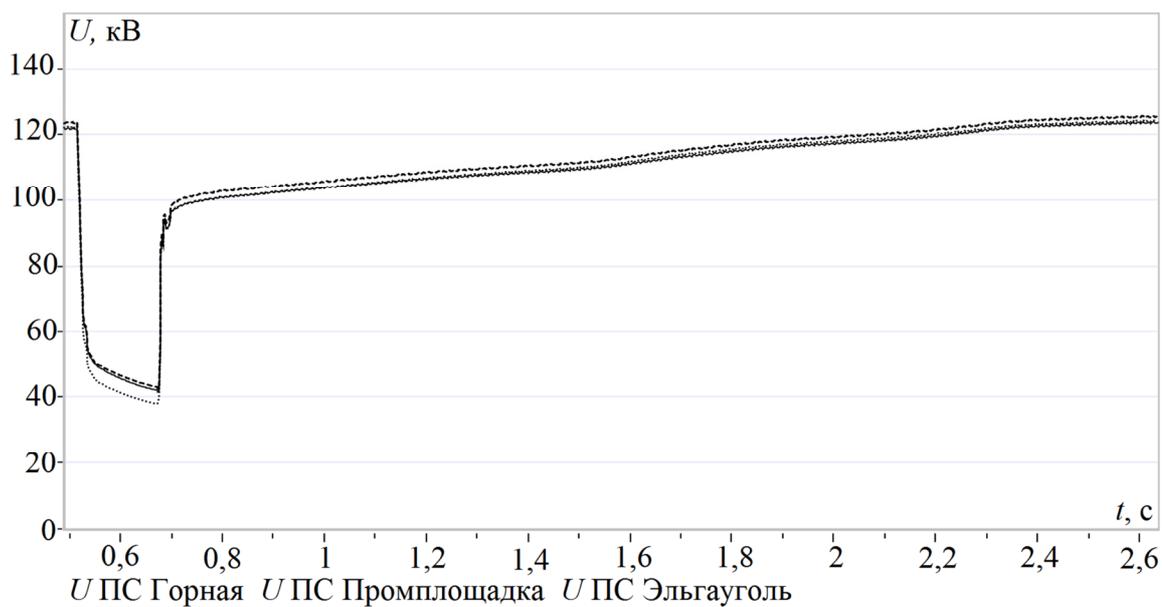


Рис. 4.35. Напряжения на шинах 110 кВ

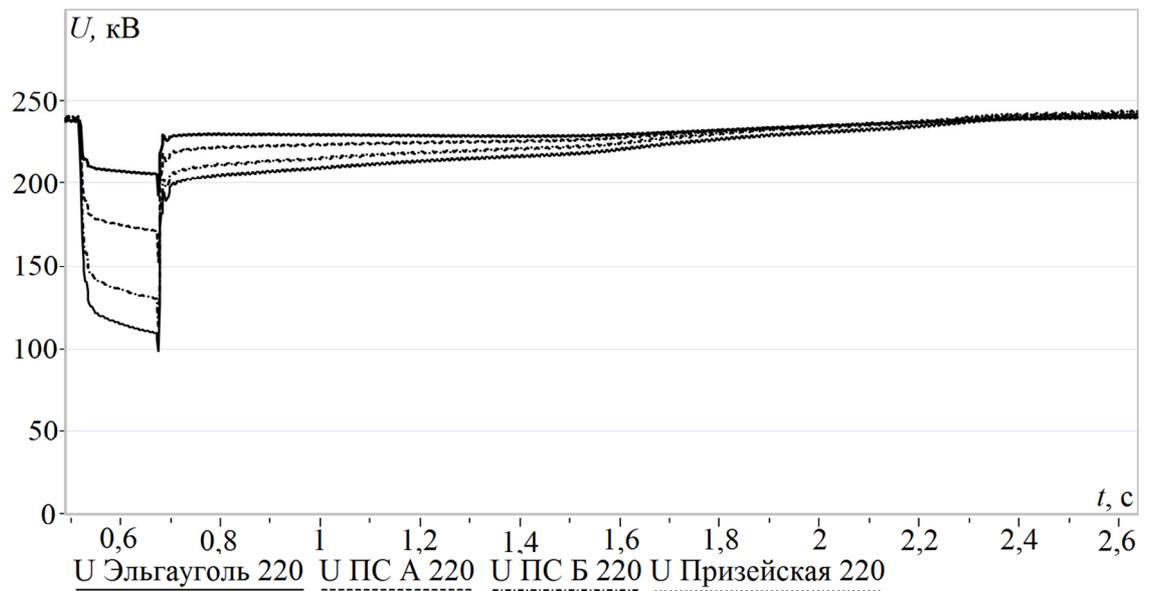


Рис. 4.36. Напряжения на шинах 220 кВ

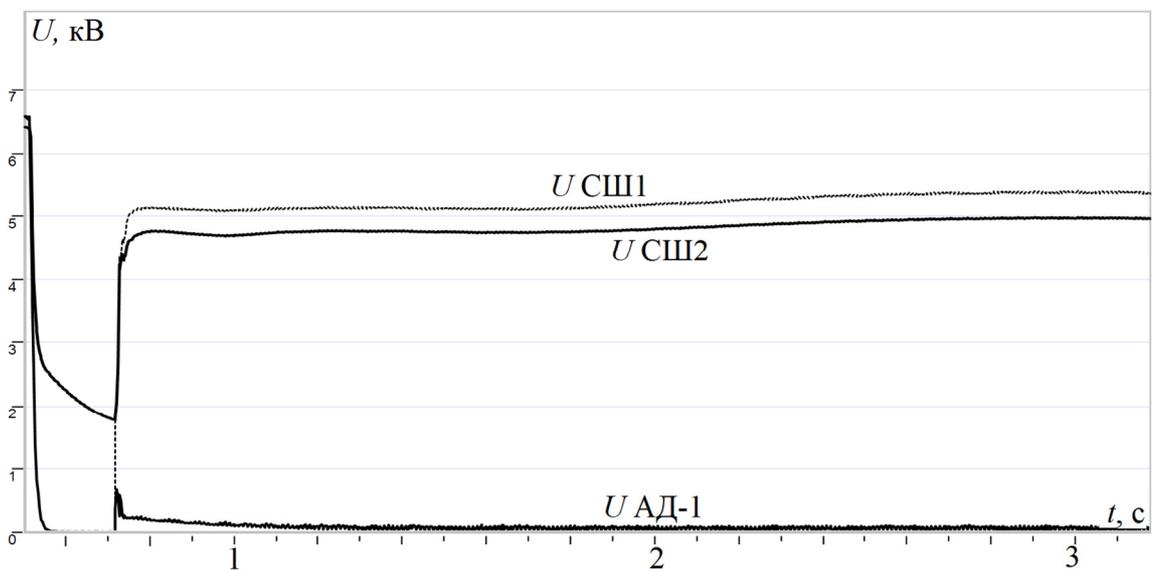


Рис. 4.37. Напряжения на шинах 6,3 кВ ПС Промплощадка

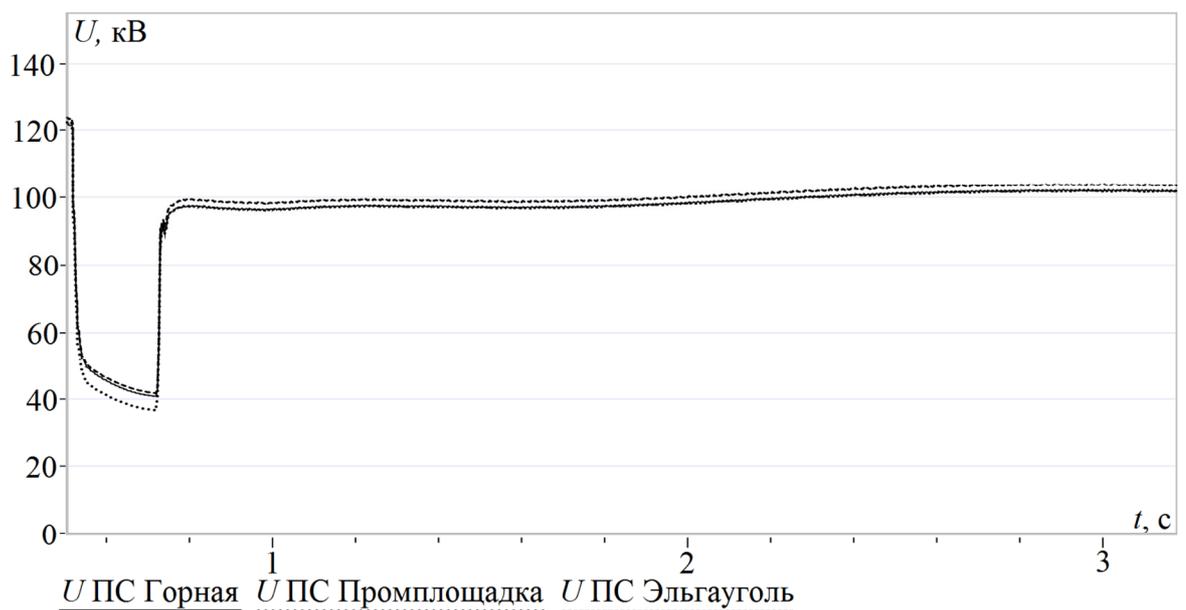


Рис. 4.38. Напряжения на шинах 110 кВ

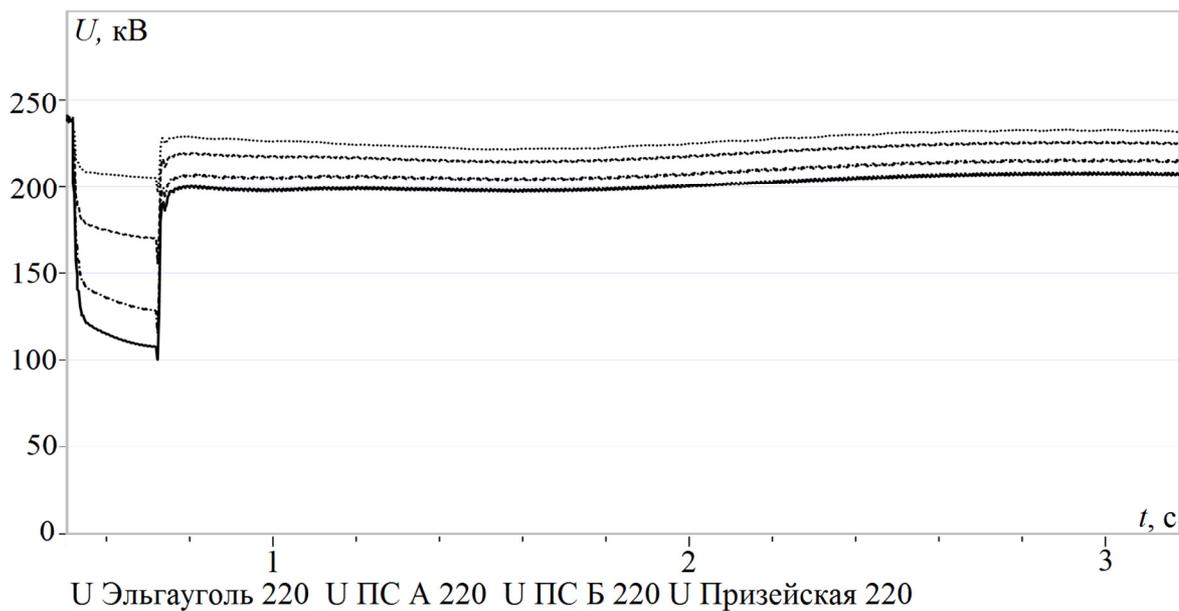


Рис. 4.39. Напряжения на шинах 220 кВ

Длительность режима КЗ 0,15 с вызывает провал напряжения и замедление скорости вращения всех мощных АД на ПС Эльгауголь, в результате чего напряжение на шинах 6,3 кВ не восстанавливается до уровня предшествующего аварийной ситуации. Подобная негативная ситуация длительного провала напряжения наблюдается на всех ПС, питаемой от ПС Эльгауголь. Длительное КЗ более 0,2 с вызывает останов асинхронных двигателей и последующему провалу напряжения после отключения КЗ, что становится причиной неуспешного самозапуска асинхронных двигателей.

Установка УШР слабо влияет на режимную ситуацию, поскольку за время существования КЗ не успевает изменить РМ. Результаты моделирования работы энергокластера Эльгауголь представлены на рисунках 4.40–4.43 для длительности КЗ 0,15 с и на рисунках 4.44–4.47 для длительности КЗ 0,2 с.

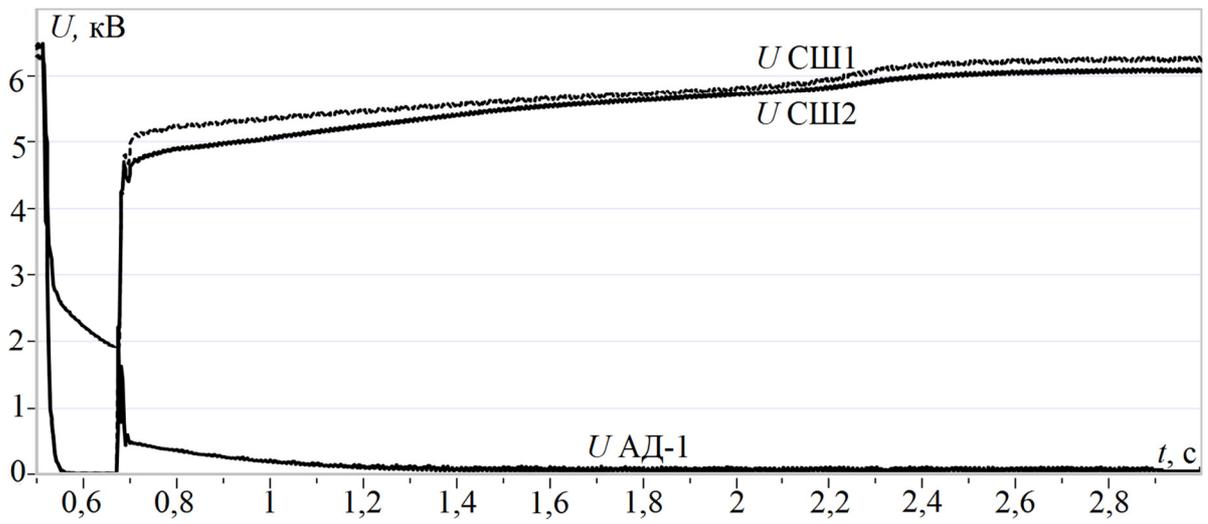


Рис. 4.40. Напряжения на ПС Промплощадка

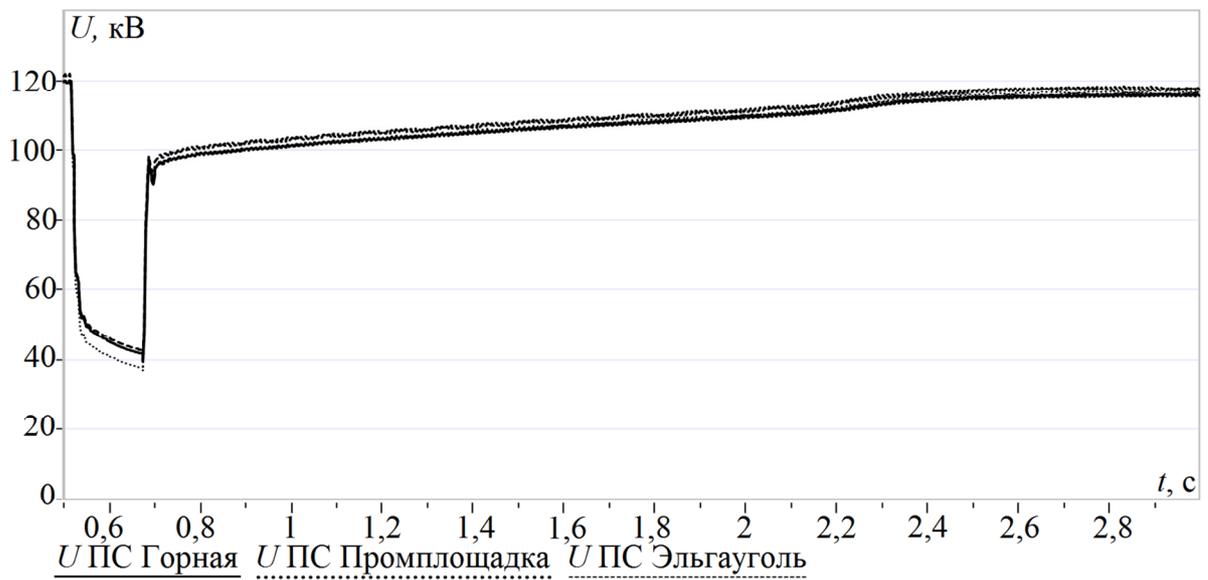


Рис. 4.41. Напряжения на шинах 110 кВ

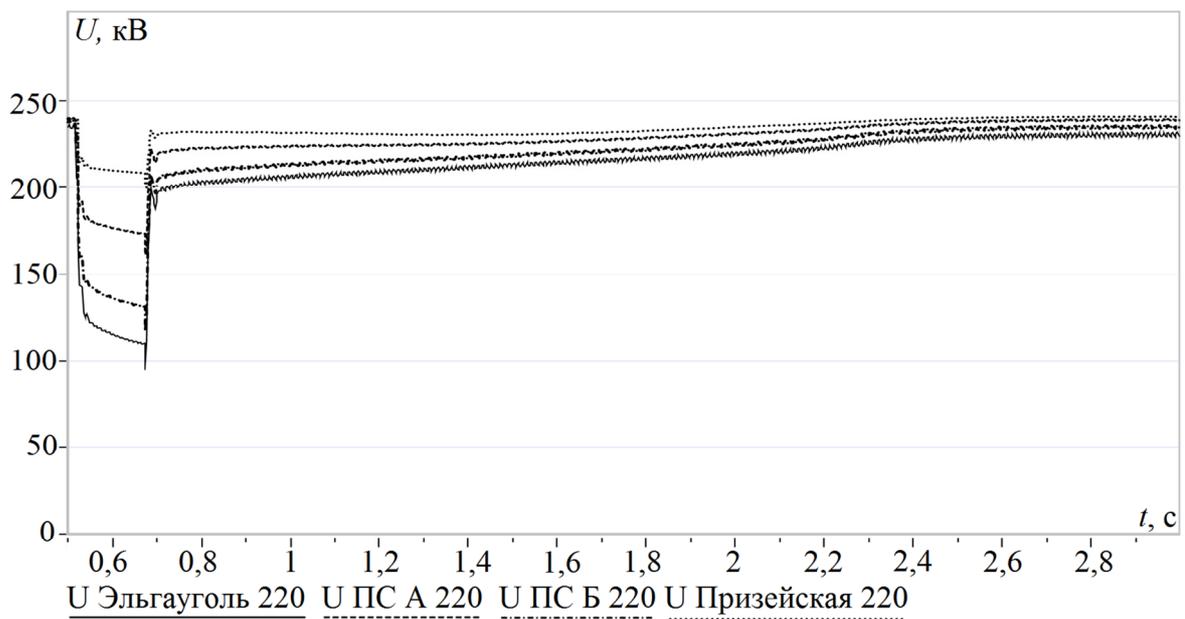


Рис. 4.42. Напряжения на шинах 220 кВ

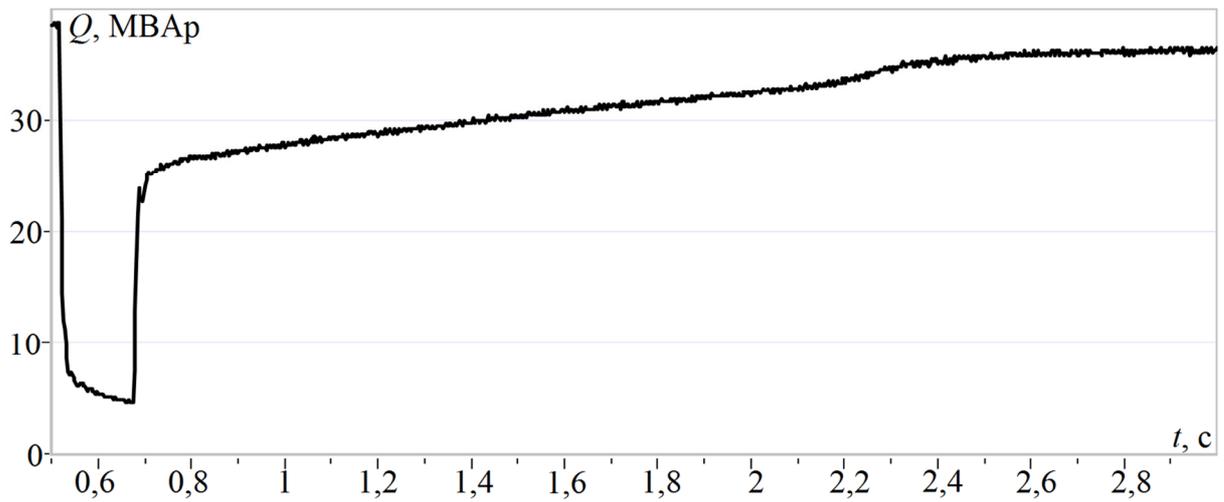


Рис. 4.43. Мощность УШР

Изменение мощности УШР в данном режиме в основном определяется изменением (провалом) напряжения на шинах, а не действием его САУ УШР.

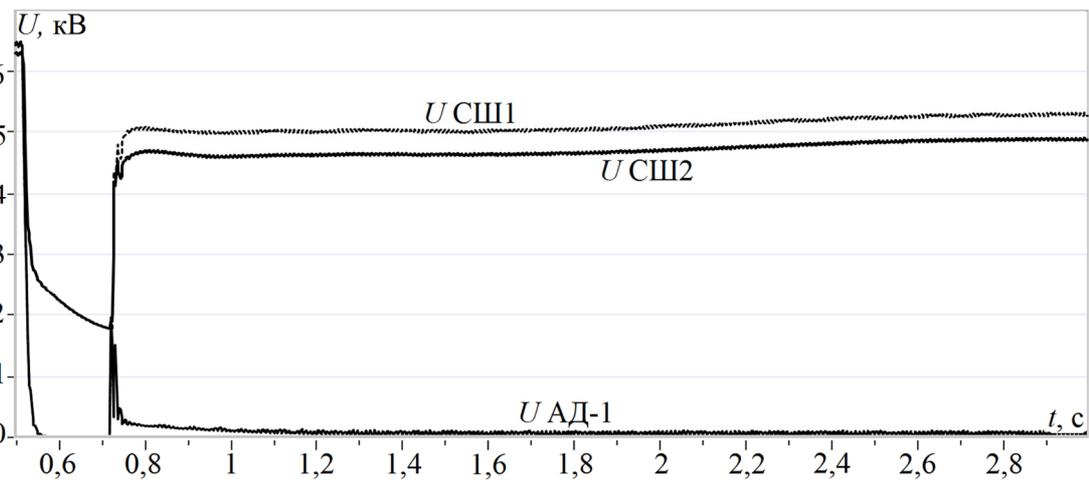


Рис. 4.44. Напряжения на ПС Промплощадка

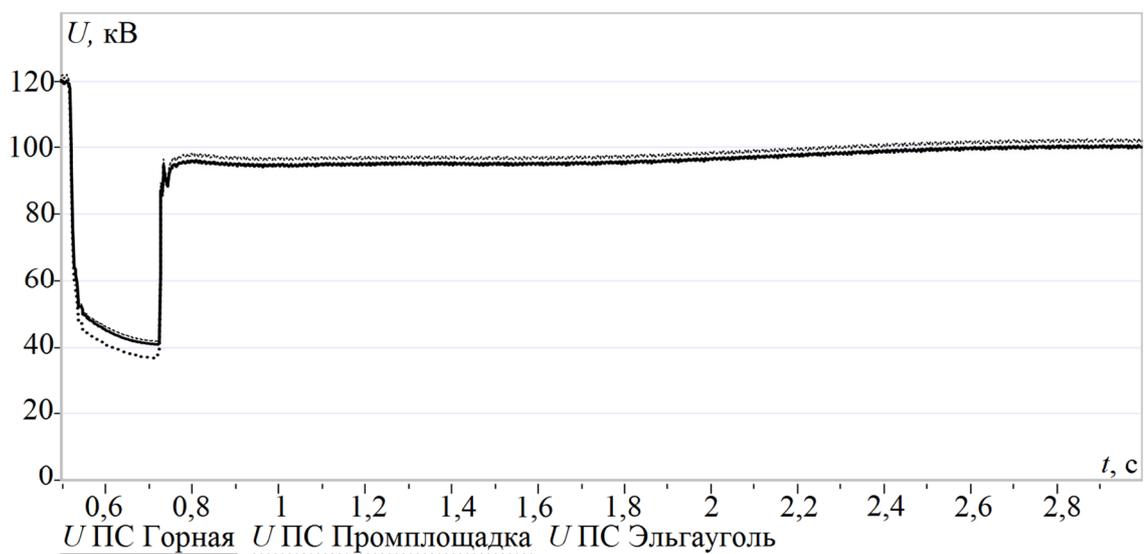


Рис. 4.45. Напряжения на шинах 110 кВ

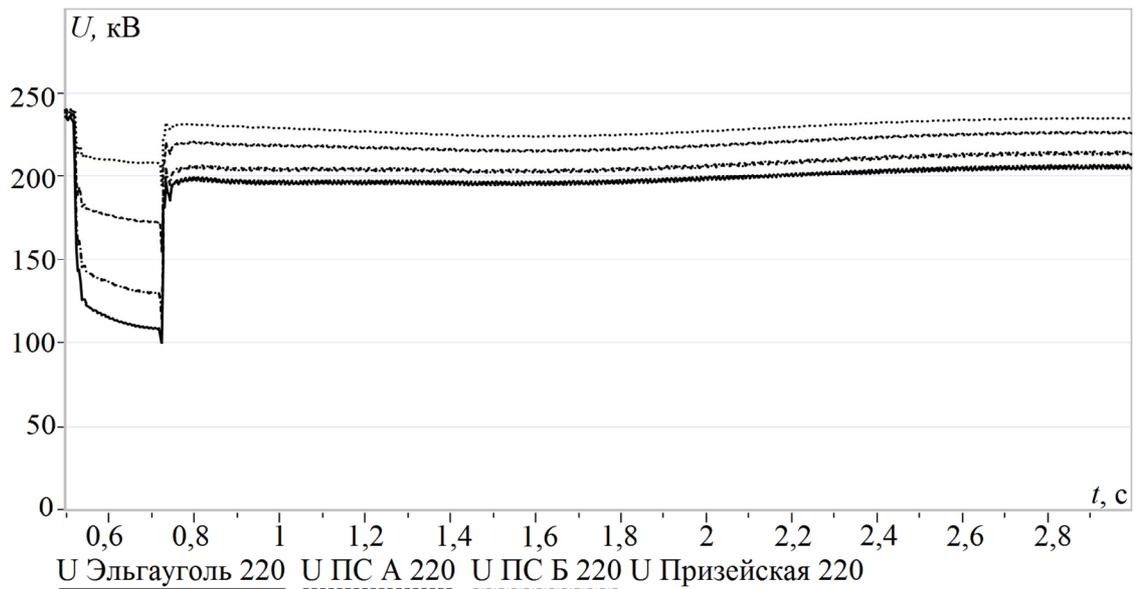


Рис. 4.46. Напряжения на шинах 220 кВ

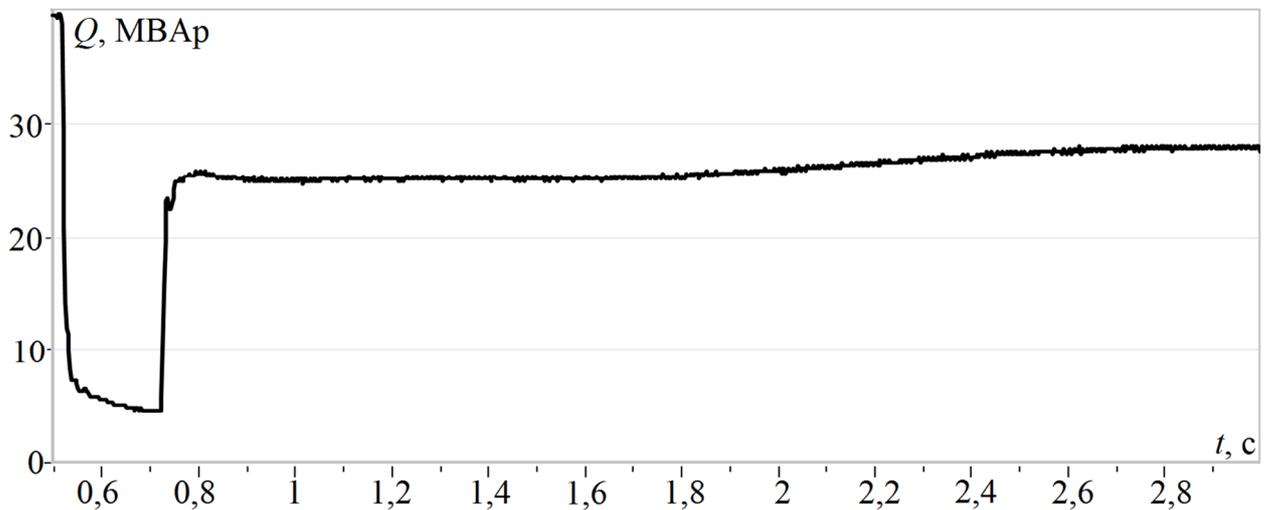


Рис. 4.47. Мощность УШР

УШР ввиду низких динамических характеристик не способен активно влиять на быстропротекающие переходные процессы и не может быть использован для стабилизации напряжения в аварийных режимах. В результате КЗ, напряжение на первой системе шина ПС Промплощадка становится равно нулю, а напряжение на второй системе шин – 1,7 кВ.

Результаты исследования работы СТАТКОМ и энергокластера Эльгауголь со СТАТКОМ приведены на рисунках 4.48–4.53 для длительности КЗ 0,2 с и на рисунках 4.48—4.57 для длительности КЗ 0,4 с.

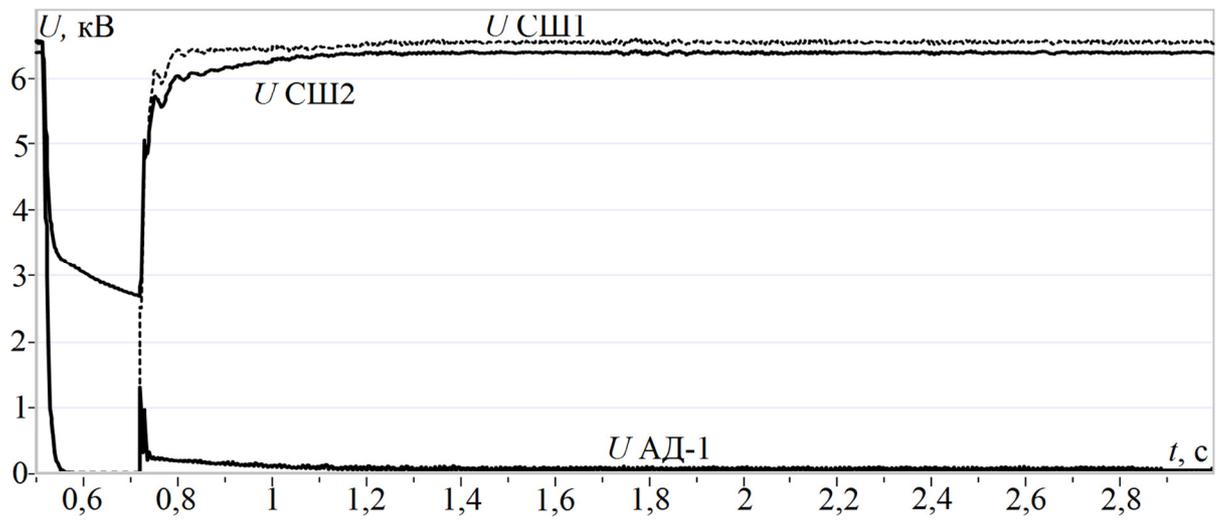


Рис. 4.48. Трехфазное КЗ с отключением через 0,2 с

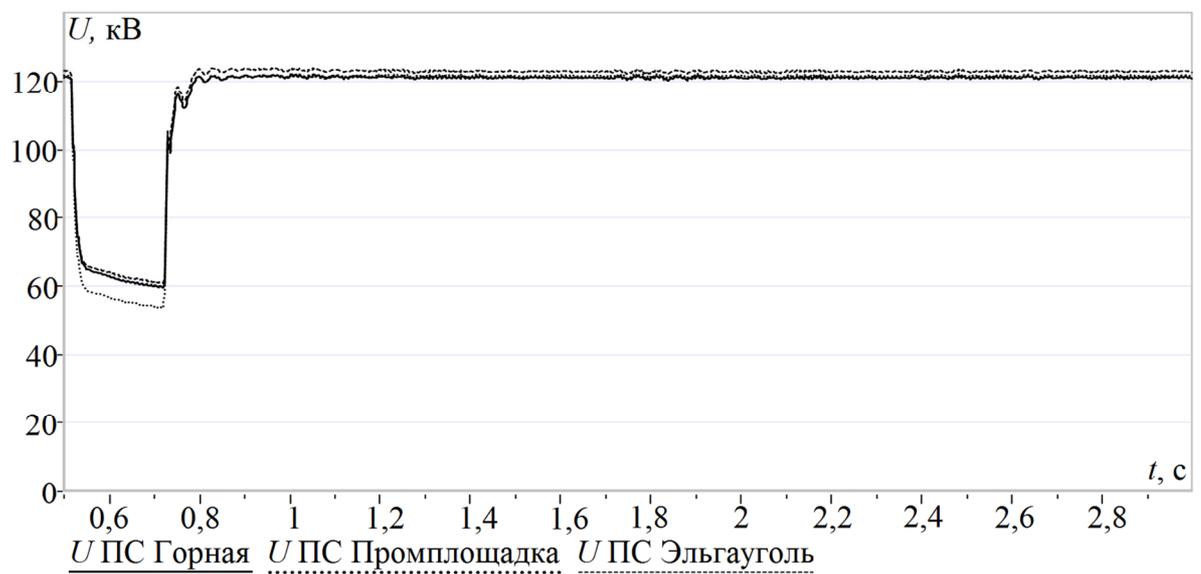


Рис. 4.49. Напряжения на шинах 110 кВ

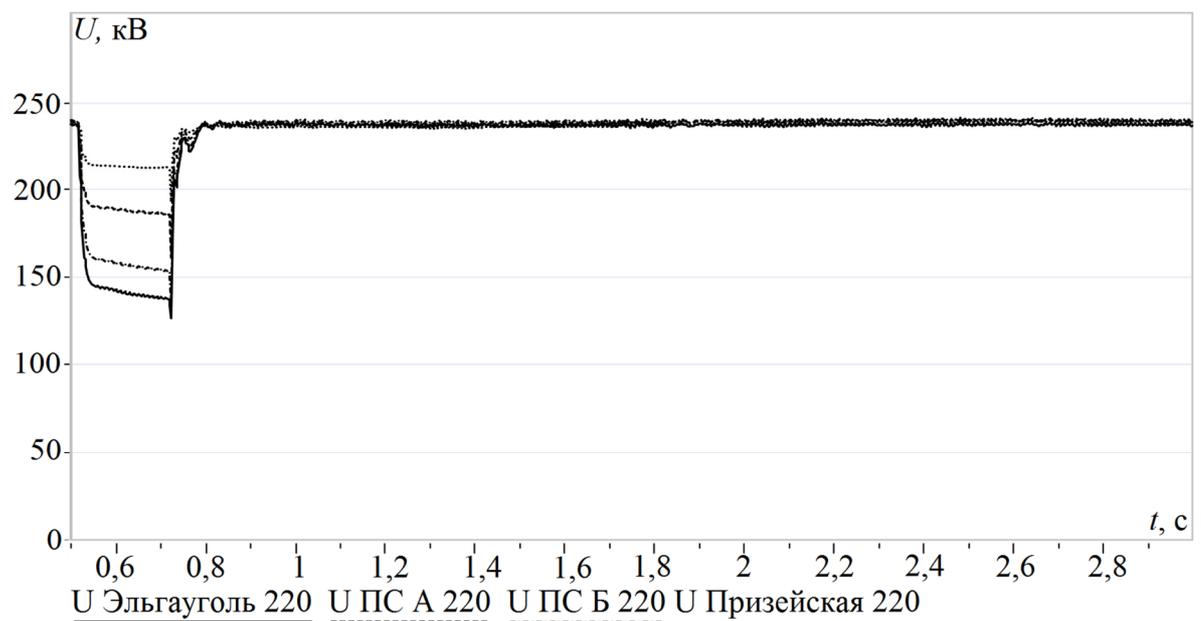


Рис. 4.50. Напряжения на шинах 220 кВ

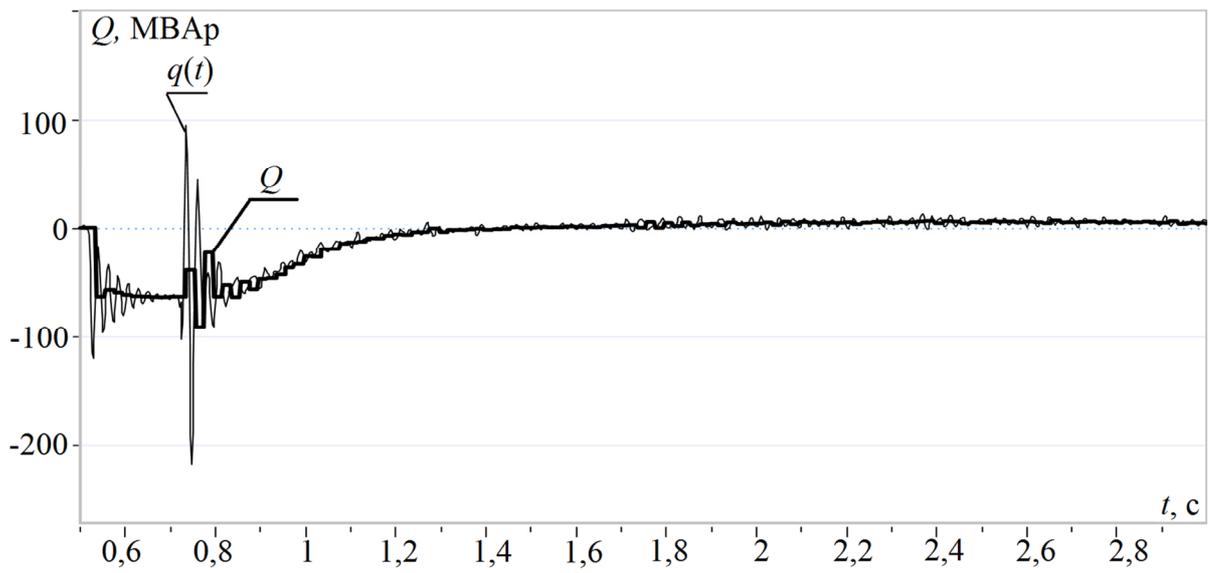


Рис. 4.51. Мощность СТАТКОМ

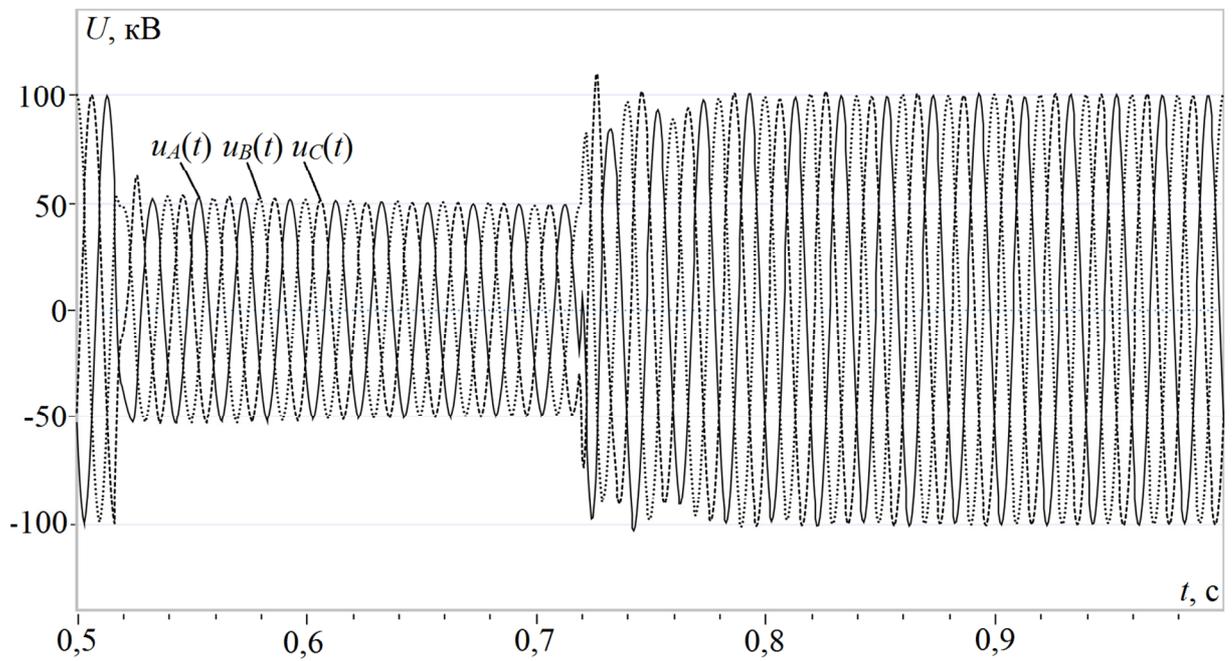


Рис. 4.52. Мгновенные значения напряжений СТАТКОМ

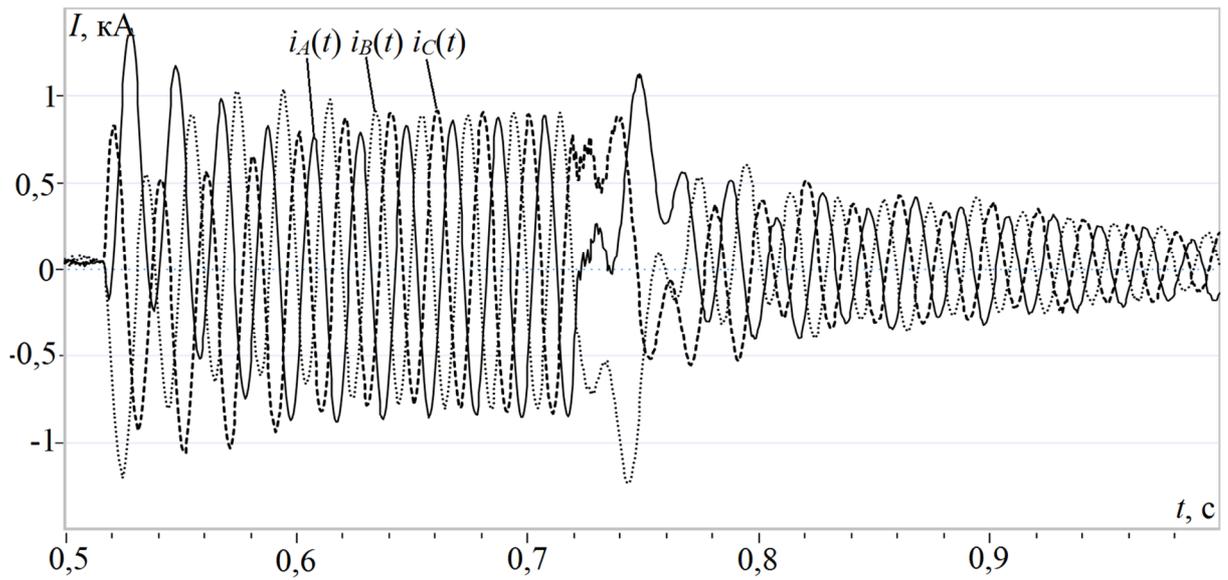


Рис. 4.53. Мгновенные значения токов СТАТКОМ

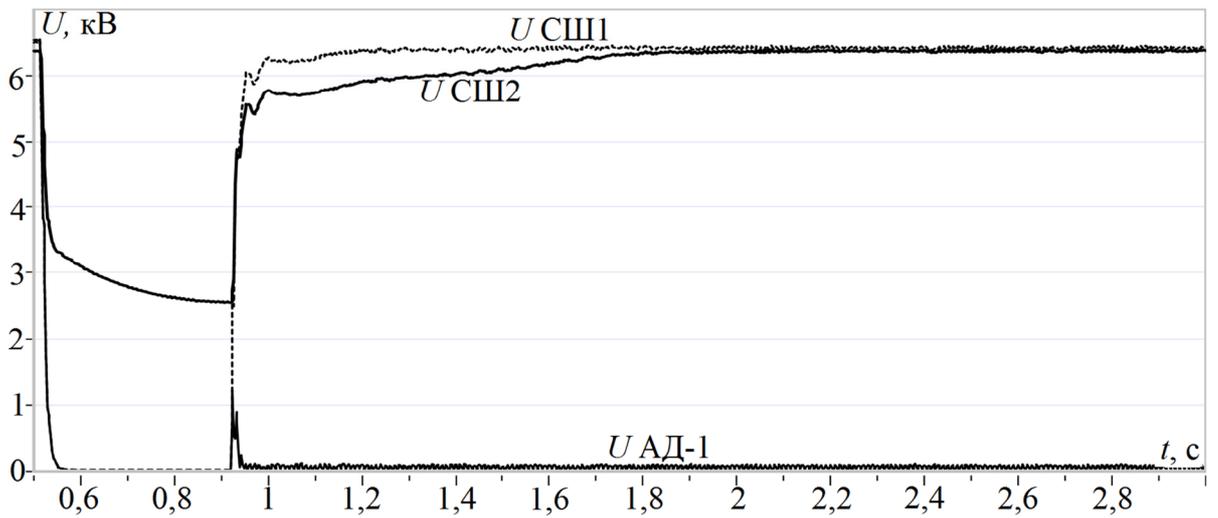


Рис. 4.54. Напряжения на ПС Промплошадка

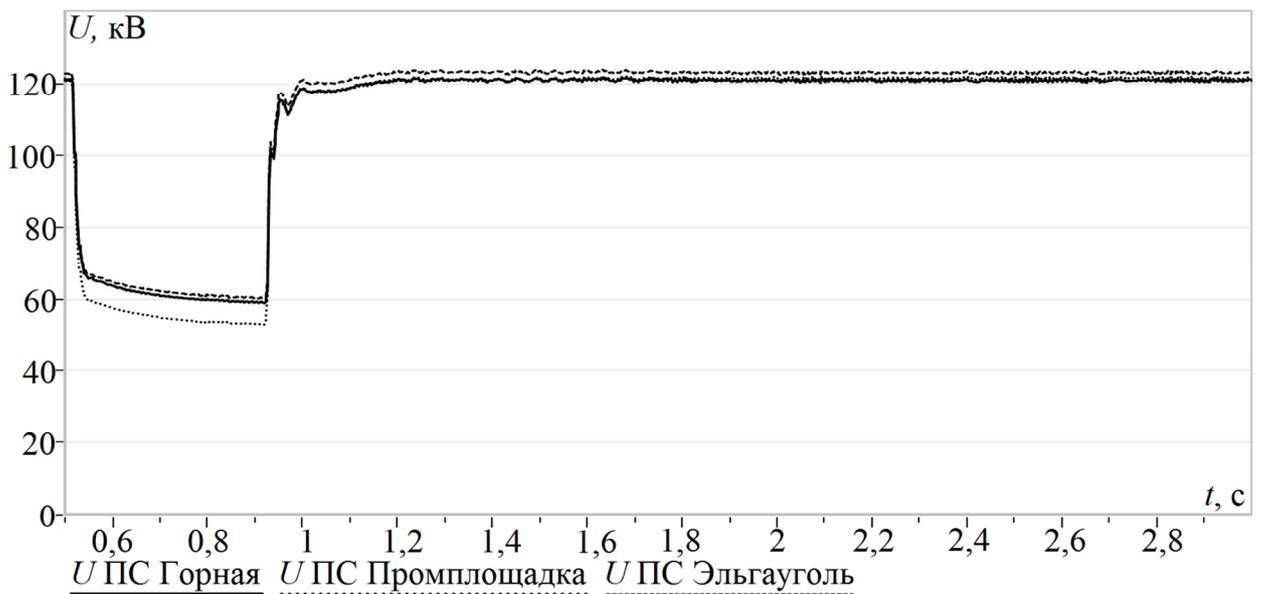


Рис. 4.55. Напряжения на шинах 110 кВ

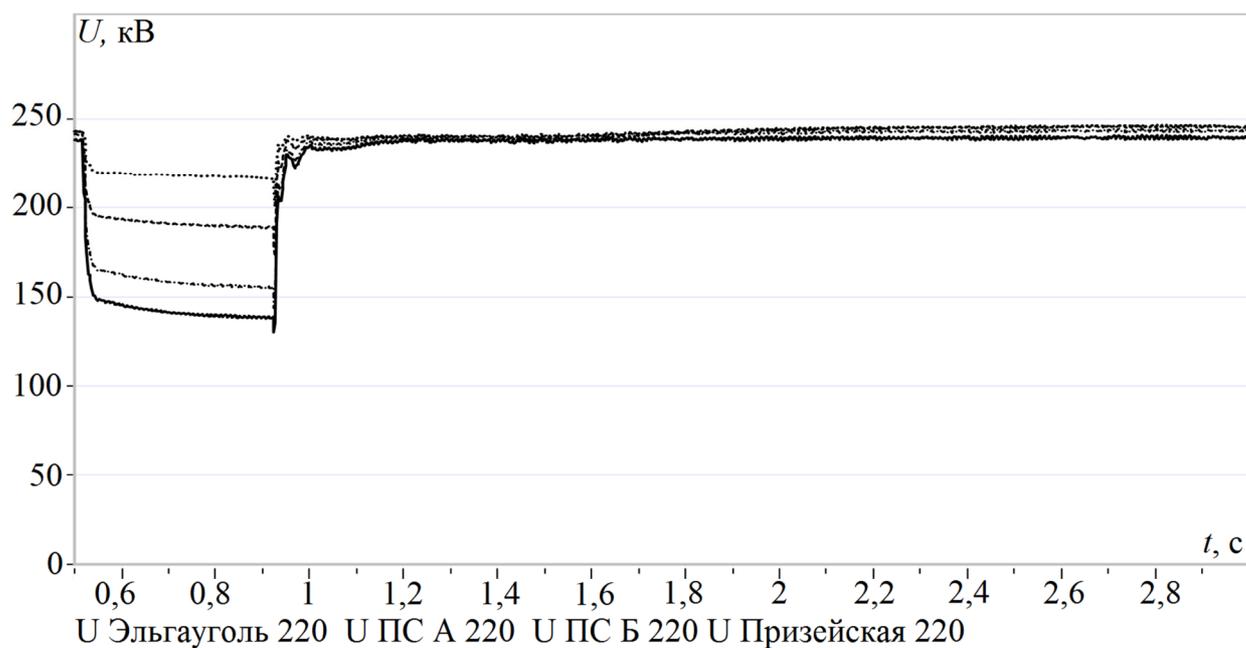


Рис. 4.56. Напряжения на шинах 220 кВ

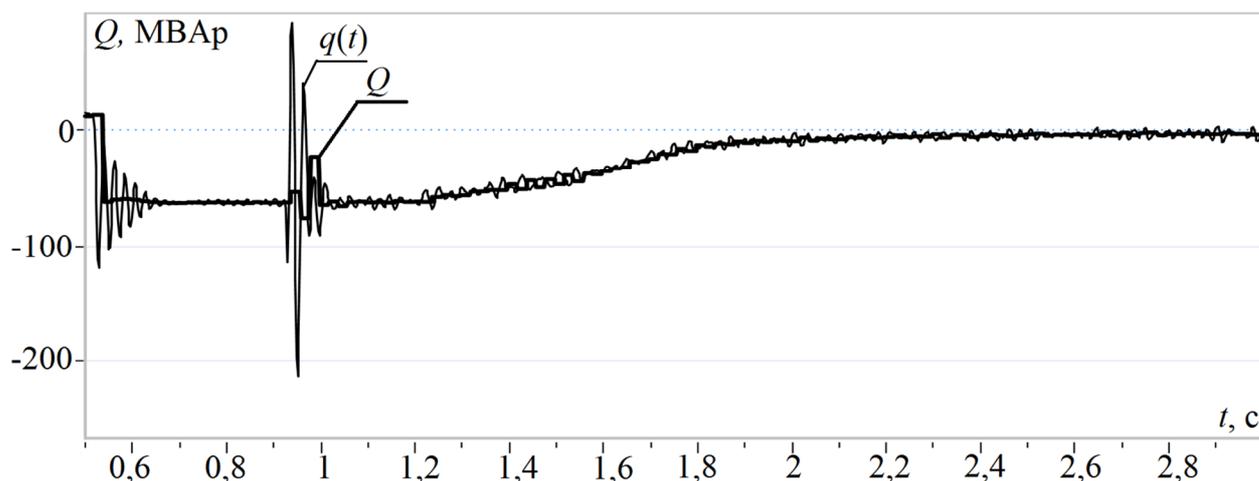


Рис. 4.57. Мощность СТАТКОМ

В результате КЗ в течение 0,2 с при использовании СТАТКОМ, напряжение на шинах ПС Промплощадка становится равным нулю на первой системе шин и 2,7 кВ на второй системе шин, в то время как для схемы с УШР 0 кВ и 1,7 кВ соответственно. После устранения КЗ действие СТАТКОМ позволяет быстрее восстановить напряжение на шинах ПС Промплощадка и устойчивость работы двигательной нагрузки сохраняется.. Максимальная длительность КЗ, не вызывающая останова АД, составляет 0,3 с. После ликвидации КЗ по мере разгона АД потребляемая ими мощность снижается, и СТАТКОМ, поддерживая заданный уровень напряжения, уменьшает генерацию РМ.

При затягивании срабатывания защиты и отключения выключателей до 0,4 с АД, подключенный к первой системе шин, как и АД-1, останавливается, однако двигательная нагрузка на второй системе шин продолжает нормально функционировать.

4.3 Выводы

Разработанные ПТС моделирования СТАТКОМ позволяют непрерывно в реальном времени осуществлять всережимное бездекомпозиционное моделирование процессов в силовом оборудовании установки СТАТКОМ с учетом действия САУ.

САУ, реализованная в ПТС моделирования СТАТКОМ, может работать в режиме без обратной связи при осуществлении задания ортогональных составляющих вектора напряжения СП или в режиме с обратной связью, обеспечивая регулирование по заданной уставке РМ или напряжения в точке присоединения.

Динамические свойства ПТС моделирования СТАТКОМ могут быть настроены путем изменения параметров и структуры САУ для конкретных реальных установок СТАТКОМ, что позволяет адекватно исследовать влияние СТАТКОМ на режим работы оборудования и ЭЭС в целом.

Сравнительные характеристики и поведенческие особенности функционирования, полученные в результате исследований ПТС моделирования СТАТКОМ в составе модели ЭЭС подтверждают адекватность моделирования во всевозможных режимах работы сети.

Быстродействие СТАТКОМ позволяет значительно повысить качество электроэнергии и надежность электроснабжения потребителя, поскольку осуществляют управление и в нормальных и аварийных режимах.

В результате исследований, влияние на устойчивость работы генераторов в аварийных и послеаварийных режимах не выявлено, продолжительность и амплитуда колебаний углов генераторов практически не изменяется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы являются разработанные программно-технические средства всережимного бездекомпозиционного моделирования в реальном времени статических синхронных компенсаторов в составе модели энергосистемы при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных процессах. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие результаты:

1. Обосновано направление решения проблемы всережимного бездекомпозиционного моделирования СТАТКОМ с помощью программно-технических средств;

2. Разработана структура и принцип построения программно-технических средств всережимного непрерывного моделирования в реальном времени функционирования СТАТКОМ в составе ЭЭС;

3. Синтезировано математическое описание процессов в трехфазном силовом оборудовании и системе автоматического управления СТАТКОМ, позволяющее осуществлять его всережимное бездекомпозиционное моделирование при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных процессах в оборудовании СТАТКОМ;

4. Разработан гибридный процессор СТАТКОМ (ГПС), обеспечивающий непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной требуемой инструментальной погрешностью системы математических уравнения, описывающих процессы в СТАТКОМ, с учетом различных его типы;

5. Получены результаты компьютерного моделирования работы схем всех основных функциональных блоков ГПС, с учетом аппаратной реализации, для определения их технических характеристик и требований к схеме и применяемой элементной базе;

6. Разработан экспериментальный аппаратный блок ГПС способный осуществлять моделирование функционирования СТАТКОМ в составе модели энергосистемы;

7. Разработано специализированное программное обеспечение, включающее комплекс программ на всех уровнях его реализации для осуществления в реальном времени управления параметрами и структурами модели, наблюдения результатов моделирования и их преобразования с целью последующего анализа;

8. Проведены экспериментальные исследования программно-технических средств моделирования СТАТКОМ в автономных режимах и в составе модели энергосистемы, подтверждающие адекватность их функционирования реальным СТАТКОМ.

Список использованных источников

- 1) Идельчик В.И. Электрические системы и сети : учебник для вузов / В. И. Идельчик. – 2-е изд., стер. – М. : Альянс, 2009. – 592 с.
- 2) Стабилизация напряжения электрической сети высокого напряжения внутрисетевыми управляемыми источниками реактивной мощности индуктивно-емкостного типа. Хроника. // Электротехника. 2011. – №3. – с.58–62;
- 3) Ситников В.Ф., Чемоданов В.И., Бобылева Н.В., Адамоков Р.К. Основные направления развития электроэнергетики России в период до 2020 г. //Электрические станции. – 2007, – №5, – с. 8–12.
- 4) ПРОГРАММА. «Создание в единой энергосистеме (ЕЭС) России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока и устройств регулирования напряжения» // Прил. 5 к разделу 5 приказа №488 от 19.03.2003. – М.: ОАО «РАО ЕЭС», 2003.
- 5) Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России / Прил. 1 к распоряжению от 22.01.2009 №22р. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2009.
- 6) Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередач переменного тока в энергосистемах. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – 312 с.: ил.
- 7) Ситников В.Ф. Совершенствование методов и средств управления режимами электроэнергетических систем на основе элементов гибких линий электропередач (FACTS): Дисс. на соискание степени докт. техн. наук. – Иваново: ИГЭУ, 2009. – 297 с.
- 8) Zhang X.-P., Rehtanz C., Pal B., Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control. Berlin: Springer, 2006. – 383 pp.
- 9) Glanzmann G. FACTS. Flexible Alternating Current Transmission Systems. URL: http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/Glanzmann_FACTS_internal.pdf. Дата обращения: 08.05.2013

- 10) Hingorani N., Laszlo G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible alternative current transmission system / N. Hingorani, L. Gyugyi. – IEEE Press. – 2000. – 432 pp.
- 11) K. R. Padiyar. Facts controllers in power transmission and distribution /
- 12) Singh B., Saha R. Chandra A., Al-Haddad K. Static synchronous compensator (STATCOM): a review // IET Power Electron., 2009, – Vol. 2, – Iss. 4, – pp. 297-324.
- 13) Калиткин Н.Н. Численные методы. Главная редакция физ.-мат. литературы изд-ва «Науки». – М., – 1978. – 512 с.: ил.
- 14) Веников В.А. Развитие некоторых методов моделирования в задачах электроэнергетики // Энергетика и транспорт. 1970. – №4. – С. 12-21.
- 15) ГОСТ Р 54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2013–01–01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.
- 16) Суд В.К. HVDC and FACTS Controllers: применение статических преобразователей в энергетических системах: Пер. с англ.: НП «НИИА», 2009. – 344 с., ил.
- 17) Noroozian M., Petersson N., Thorvaldson B., Nilsson B. A., Taylor C. W., Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application. // IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo, Sep. 7–12, 2003, vol. 3, pp. 1143–1150.
- 18) Mathur R.M., Varma R.K. Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems. Piscataway // IEEE Press, 2002. – 518 pp.
- 19) Кочкин В.И. Новые технологии повышения пропускной способности ЛЭП. Управляемая передача мощности. Статком. URL: http://enercomserv.ru/?issue_id=6&id=16. Дата обращения: 01.10.2011
- 20) АBB [Электронный ресурс]: Series Compensation. Boosting transmission capacity – Электрон. Дан (1 файл). – [2011]. – Режим доступа: <http://www.abb.com> , свободный. – Загл. с экрана.

- 21) Grunbaum R., Halvarsson P., Larsson D., Jones P. Conditioning of power grids serving offshore wind farms based on asynchronous generators // Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. – 2004. – vol. 1, Mar.-Apr. 2004, pp. 34–39.
- 22) Иванкин В.Н., Магницкий А.А., Шульга Р.Н. Сравнительный анализ различных средств управляемой поперечной компенсацией линий электропередач. [Электронный ресурс]. – М. [2006] – Режим доступа <http://www.energo-info.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
- 23) Гвоздев Д.Б., Илюшин П.В., Кочкин В.И., Фокин В.К., Фролов В.И. Применение адаптивной модели энергосистемы для управления источниками реактивной мощности // Электричество. – 2011. – №2. – с. 17–27.
- 24) Станин В.В. Применение устройств компенсации реактивной мощности для оптимизации режимов и устойчивости межсистемной транзитной электропередачи 330 кВ Кольская АЭС – Ленэнерго: Автореферат ... дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2005 – 23 с.
- 25) СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения. – Введ. 2007–12–27. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2007. – 123 с.
- 26) Кошелев К.С. Исследование и разработка средств защиты статического тиристорного компенсатора реактивной мощности с цифровой системой управления: Дисс. на соискание степени канд. техн. наук. – М.: МЭИ (ТУ), 2008. – 191 с.
- 27) Розанов Ю.К., Кошелев К.С., Смирнов М.И. Цифровая система управления статическим компенсатором реактивной мощности // Электричество. – 2006. – №7. – с. 25–30.
- 28) Мурзиков А.А. Повышение устойчивости синхронных генераторов в системе внутривозовского электроснабжения с помощью быстродействующего компенсатора реактивной мощности: Дисс. на

- соискание степени канд. техн. наук. – Магнитогорск: МГТУ, 2011. – 173 с.
- 29) Рывкин С.Е., Изосимов Д.Б. Широтно-импульсная модуляция напряжения трехфазных автономных инверторов // Электричество. – 1997. – №6. – с. 34–39.
- 30) Лозина Н.Г., Мазуров М.И., Николаев А.В. Повышение качества напряжения на шинах распределительной сети с помощью СТАТКОМ. [Электронный ресурс] – Электрон. Дан (1 файл). – [2011]. – Режим доступа: <http://expoelectroseti.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
- 31) Шейко П.А., Балыбердин Л.Л., Мазуров М.И., Николаев А.В. СТАТКОМ как средство компенсации реактивной мощности в сетях высокого напряжения // Новое в российской энергетике. – 2003. – №5. – с. 39–43.
- 32) Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. О задачах и проблемах внедрения технологии FACTS в магистральные электрические сети центра [Электронный ресурс – Электрон. Дан (1 файл). – [2011]. – Режим доступа: <http://www.expoelectroseti.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
- 33) Larsson T., Poumarede C. STATCOM, an efficient means for flicker mitigation. // IEEE Power Engineering Society. – 1999 Winter Meeting, vol. 2, pp. 1075–1077.
- 34) Molina M. G., Mercado P. E. Control Design and Simulation of DSTATCOM with Energy Storage for Power Quality Improvements. // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference Latin America, Caracas, Venezuela, Aug. 2006.
- 35) Qiao W., Venayagamoorthy G.K., Ronald G.H. Real-time implementation of a statcom on a wind farm equipped with doubly fed induction generators. // IEEE Transactions on Industry Applications, 2009. – 45(1). – pp. 98–107.
- 36) T. Yoshii, S. Inoue, H. Akagi. A 6.6-kV Transformerless Cascade PWM STATCOM. Experimental Verification by a Three-Phase 200-V, 10-kVA

- Laboratory System // Electrical Engineering in Japan, – Vol. 170, – №1, – 2010. – pp. 55–64.
- 37) Разработка бестрансформаторного STATCOM на 6,6 кВ на базе пятиуровневого инвертора с экспериментом на опытном образце 200 В/10 кВА. URL: <http://www.matic.ru/doc/articles/article2.pdf>. Дата обращения: 01.10.2011
- 38) Y. Kondo, H. Fujita, H. Akagi. A 6.6-kV Transformerless STATCOM Based on a Five-Level Diode-Clamped Converter. Experiments Using a Three-Phase Laboratory Model Rated at 200 V and 10 kVA // Electrical Engineering in Japan, – Vol. 168, – No. 2, – 2009 – pp.60–68.
- 39) M. Saeedifard R. Iravani J. Pou. Control and DC-capacitor voltage balancing of a space vector-modulated five-level STATCOM // IET Power Electron., – 2009, – Vol. 2, – Iss. 3, – pp. 203–215.
- 40) Пат. 2159951 Российская Федерация. Способ многозонного широтно-импульсного управления вентильным преобразователем / Сидоров С.Н. // 2009.
- 41) Пат. 2384876 Российская Федерация. Многоуровневый активный фильтр / М. Растоги, П.У. Хэммонд, С.Р. Симмс // Бюл. №8. –2009.
- 42) Пат. 31469 Российская Федерация. Устройство для моделирования выпрямителей тяговых подстанций / Л.С. Лабунский, Д.А. Волков, В.М. Фальков // 2003.
- 43) Николаев А.В. Разработка принципов управления статическим синхронным компенсатором (СТАТКОМ) и исследование его работы на подстанциях переменного и постоянного тока: Дисс. на соискание степени канд. техн. наук. – Санкт-Петербург: НИИПТ, 2005. – 164 с.
- 44) Пешков М.В. Разработка и исследование системы управления статическим компенсатором реактивной мощности СТАТКОМ для электроэнергетических систем: Дисс. на соискание степени канд. техн. наук. – М.: ОАО «НТЦ электроэнергетики», 2008. – 159 с.

- 45) Киселев М.Г., Розанов Ю.К. Анализ режимов работы статического синхронного компенсатора реактивной мощности в режиме симметрирования нагрузки // Электричество, – 2012. – №3. – С. 63–69. (САУ, режимы работы, надстройки САУ)
- 46) Вариводов В.Н. Новые технологии для российских энергетических компаний // Энергосбережение и водоподготовка. – 2008. – №4. – с. 10–13.
- 47) Полупроводниковые приборы [Электронный ресурс] – Электрон. Дан (1 файл). – [2011]. – Режим доступа <http://www.abb.com>, свободный. – Загл. с экрана.
- 48) Ситников В.Ф., Рябчинский М.В. Схемы полупроводниковых преобразователей для систем электропередачи // Электрические станции. – 2007. – №4. – с. 40–44.
- 49) Пат. 2377631 Российская Федерация. Способ регулирования мощности и устройство трехфазного инвертора / Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев, В.А. Тихомиров, К.П. Рябченко // Бюл. №36. –2009.
- 50) Донской Н., Иванов А., Матисов В., Ушаков И. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // Силовая электроника. – 2008. – №1. – с. 43–46.
- 51) Хохлов Ю.И., Гиззатуллин Д.В., Осипов А.Г. Моделирование электромагнитных процессов в компенсированном выпрямителе с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2008. – №11. – с. 32–38.
- 52) D. Hanson, «A transmission SVC for National Grid Company pic, Incorporating a ± 75 MVar STATCOM», IEE Colloquium on Flexible AC Transmission Systems, London, Nov. 1998.
- 53) P.K. Jin, M.S.A. Dahidah. Recent advances in multilevel voltage source converters based STATCOM technology // International Review of Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 4, №6. – p. 1164–1181.

- 54) Олышванг М.В., Шитов В.А. Локальные частоты единой энергосистемы и их стабилизация по всемирному времени. [Электронный ресурс] – Электрон. Дан (1 файл). – [2011]. – Режим доступа <http://mvo.ipc.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
- 55) Cavaliere C.A.C., Watanabe E.H., Aredes M.. Analysis and Operation of STATCOM in Unbalanced Systems // International Conference on Power Systems Transients, IPST Rio de Janeiro, Brasil. – 2001.
- 56) Soto, D., Green, T.C. A comparison of high-power converter topologies for the implementation of FACTS controllers // IEEE Trans. Industrial Electronics. – 2002. – Vol. 49, №5. – p. 1072 – 1080.
- 57) Брошюра УШР [Электронный ресурс] – Электрон. Дан (1 файл). – [2011]. – Режим доступа <http://www.ztr.ua>, свободный. – Загл. с экрана.
- 58) Александров Г.Н., Лунин В.П. Управляемые реакторы. – Санкт-Петербург. Третье издание. Центра подготовки кадров энергетики, 2005 г.
- 59) Теличко Л.Я., Батраков Р.В. Параметрическое регулирование потоков мощности линий электропередач с применением управляемой продольной компенсации // Электротехнические комплексы и системы. – 2010. – №3. – с. 60–64
- 60) Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М., Быков В.С. Новые области эффективного применения фазорегулирующих устройств трансформаторного типа для управления параметрами электропередач переменного тока повышенной пропускной способности и режимами сложных электроэнергетических систем. [Электронный ресурс] – Электрон. Дан (1 файл). – [2010]. – Режим доступа: <http://www.energo-info.ru> , свободный. – Загл. с экрана.
- 61) Рашитов П.А. Разработка и исследование алгоритмов управления мощными полупроводниковыми фазоповоротными устройствами для объектов единой национальной электрической сети России: Дисс. на соискание степени канд. техн. наук. – М: МЭИ (ТУ), 2011. – 162 с.

- 62) Рашитов П.А., Ремизевич Т.В. Анализ режимов коммутации тиристорного моста переменного тока // Силовая электроника. – 2010. – №3. – с. 24–28.
- 63) Аналитика – Электрические сети. [Электронный ресурс]: Устройства FACTS – тяжелая артиллерия для умных сетей. – Электрон. Дан (1 файл). – [2010]. – Режим доступа: <http://www.energyland.info>, свободный. – Загл. с экрана.
- 64) Теличко Л.Я., Батраков Р.В. Комплексное управление потоками мощности в сетях переменного тока // Вести высших учебных заведений Черноземья. – №4. – с. 3–7.
- 65) Теличко Л.Я., Батраков Р.В. Регулирование потоков мощности по линиям электропередач с применением управляемой продольной компенсации // Электротехнические комплексы и системы. – 2008. – №3. – с. 15–18.
- 66) Matele, M. Enhancing of transmission capability of power corridors by means of series compensation // ABB Power Systems AB, Vasteras, Sweden. – 1999.
- 67) Ивакин В.Н., Магницкий А.А. Устройства продольной компенсации на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах // Электротехника. – 2008. – №10. – с. 47-57.
- 68) В.М. Ремезовский, И.В. Беляев. Моделирование работы управляемых компенсаторов в электрических сетях // Вестник МГТУ, том 13, №4/2, 2010 г. – стр.923–924.
- 69) Fukuda S., Imamura R. Application of a sinusoidal internal model to current control of three-phase utility-interface converters. – IEEE Trans. on Industrial Electronics, April, 2005, vol. 52, № 2
- 70) Латыпов Д.Д. Исследование режимов и устойчивости электроэнергетической системы, содержащей управляемую электропередачу: Автореферат ... дис. канд. техн. наук. М.: МЭИ (ТУ), 2009. – 20 с.

- 71) Латыпов Д.Д. Анализ установившихся режимов электропередачи с универсальным регулятором потоков мощности // Электричество, – 2008. – №3, –С. 2–8.
- 72) Мазуров М.И., Николаев А.В. Передача постоянного тока на преобразователях напряжения как элемент управления качеством электроэнергии. URL:
http://energy.komisc.ru/downloads/docs/sbornik_2004/1_19.pdf. Дата обращения: 01.10.2011
- 73) Балыбердин Л.Л., Кощев Л.А., Лозинва Н.Г., Мазуров М.И., Ковалев В.Д. Повышение энергоэффективности энергосистем путем применения вставок постоянного тока // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2010. – №3. – 2–6.
- 74) 50 years of HVDC: 1954 – 2004[Электронный ресурс]: FACTS – Электрон. Дан (1 файл). – [2010]. – Режим доступа: <http://search.abb.com>, свободный. – Загл. с экрана.
- 75) Jacobson B., Jiang-Häfner Y., Asplund P. Rey, G., Jeroense M., Gustafsson A., Bergkvist M. Hvdс With Voltage Source Converters And Extruded Cables For Up To ± 300 kV And 1000 MW // CIGRE, Paris, France. – Aug. 27 – Sept. 1. – 2006.
- 76) Xiang D., Ran Li, et.al. Coordinated Control of an HVDC Link and Doubly Fed Induction Generators in a Large Offshore Wind Farm // IEEE Transactions on Power Delivery. – January 2006. –Vol. 21, No. 1, pp. 463-471.
- 77) Балыбердин Л.Л., Галанов В.И., Кощев П.А., Крайчик Ю.С., Мазуров М.И., Прочан Г.Г. Увеличение мощности электропередачи 330/400 кВ с вставкой постоянного тока между энергосистемами России и Финляндии // Электрические станции. 2004. № 10. – с. 32–36.
- 78) Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М. Шакарян Ю.Г., Тимашова Л.В., Карева С.Н. Методические подходы к выбору вариантов линии

- электрипередачи нового поколения на примере ВЛ-220 кВ // Проблемы региональной энергетики. – 2010. – №2. – с. 13–21.
- 79) C.A. Cañizares, Modeling and Implementation of TCR and VSI Based FACTS Controllers / Internal report, ENEL and Politecnico di Milano, – Milan, Italy. – 1999.– 43 pp.
- 80) H.F. Bilgin, M. Ermis. Current source converter based STATCOM: Operating principles, design and field performance // Electric Power Systems Research 81. – 2011. – pp. 478–487.
- 81) G. Yao, L. Tao, L. Zhou, C. Chen. State-feedback Control of a Current Source Inverter-based STATCOM
- 82) Dong S., Lehn P.W. Modeling, analysis, and control of a current source inverter-based STATCOM // IEEE Trans on Power Delivery. – 2002. – Vol. 17, – №1. – p. 248– 253.
- 83) Shauder C., Mehta H. Vector analysis and control of advanced static VAR compensators // IEE Proc.-C. – 1993. – Vol. 140, №2. – p. 299– 306.
- 84) N. Aouzellag Lahaçani, D. Aouzellag, B. Mendil. Static compensator for maintaining voltage stability of wind farm integration to a distribution network Three-phase STATCOM based on a single-phase current source inverter // Renewable Energy 35. – 2010. – pp. 2476–2482.
- 85) N. M. R. Santos, V. Fernão Pires. Three-phase STATCOM based on a single-phase current source inverter // Energy Procedia 14 – 2012. – pp. 2102–2107.
- 86) J.V.V.N Вapiraju, U.J. Shenoy K.G., Sheshadri, H.P. Khincha, D. Thukaram. Implementation of DSP Based Relaying with Particular Reference to Effect of STATCOM on Transmission Line Protection / Intemetlional Conference on Power System Technology – POWERCON 2004. – Singapore, 21-24 November. – 2004. – pp. 1381–1385.
- 87) Змазнов Е.Ю., Лозинова Н.Г., Кочкин В.И., КрайновС.В., Дроздов А.В. Результаты первых испытаний СТАТКОМ в составе Выборгской

- преобразовательной подстанции // Известия НИИ постоянного тока. – 2011. – №65. – С. 19–26.
- 88) Карнавский И.А. Моделирование статического компенсатора реактивной мощности и мощности искажений на базе каскадного многоуровневого инвертора: Автореферат ... дис. канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2012. – 19 с.
- 89) Claudio A. Cañizares, Massimo Pozzi, Sandro Corsi, Edvina Uzunovic. STATCOM modeling for voltage and angle stability studies // International Journal of Emerging Electric Power Systems Vol. 10, Iss. 3 – 2009. – 19 pp.
- 90) El-Moursi M.S., Sharaf A.M.. Novel controllers for the 48-pulse VSC STATCOM and SSSC for voltage regulation and reactive power compensation // IEEE Transaction on power system. – 2005. – Vol. 20. – №4. – P. 1985–1997.
- 91) H. Khalilinia. J. Ghaisari Sub-Synchronous Resonance Damping in Total Variation Ranges of Operating Conditions Using a STATCOM // International Review of Electrical Engineering, Vol. 4. №.1 – pp. 94–101.
- 92) Волков А.В., Волков В.А. Компенсация мощности искажений и реактивной мощности посредством активного фильтра с прогнозируемым релейным управлением // Электротехника, – 2008. – №3. – С. 2–10.
- 93) Дьяконов В.П., Пеньков А.А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. Справочник. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с., ил.
- 94) Кошелев К.С., Пешков М.В. Выбор параметров статического компенсатора реактивной мощности СТАТКОМ // Электротехника. – 2008. – №7. – С. 34–37.
- 95) N. Hatano, Y. Kishida, A. Iwata. STATCOM Using the New Concept of an Inverter System with Controlled Gradational Voltage // Electrical Engineering in Japan, – Vol. 168, №4, – 2009. – pp. 58–65.

- 96) Законьшек Я., Славутский А.Л. Цифровое моделирование современных энергосистем в реальном времени // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №01 (06). – С. 54–59.
- 97) A. K. Goswami, C. P. Gupta, G. K. Singh. Minimization of Financial Losses due to Voltage Sag in an Indian Distribution System using D-STATCOM // International Journal of Emerging Electric Power Systems Vol. 10, Iss. 3 – 2009. – 19 pp.
- 98) B. Ronner P. Maibach T. Thurnherr. Operational experiences of STATCOMs for wind parks // IET Renewable Power Generation, – 2009, Vol. 3, – Iss. 3, – pp. 349–357.
- 99) Shahgholian G. Development of State Space Model and Control of the STATCOM for Improvement of Damping in a Single-Machine Infinite-Bus // International Review of Electrical Engineering, – 2009. – Vol. 4, №6. – p. 1367–1375.
- 100) M.A. Kamarposhti, M. Alinezhad. Effects of STATCOM, TCSC, SSSC and UPFC on Static Voltage Stability // International Review of Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 4. – №6. – p. 1376–1384.
- 101) S. Rahimzadeh, M. Tavakoli Bina, A. Houshmand Viki. Steady State Model of STATCOM and SSSC Using Averaging Technique // International Review of Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 4, №6. – p. 1391–1403.
- 102) S.D.G. Jayasingha, D.M. Vilathgamuwa, U.K. Madawala. Cascade multilevel static synchronous compensator configuration for wind farms // IET Power Electron. – 2011, – Vol. 4, – Iss. 5, p. 548–556.
- 103) Saeedifard M., Nikkhajoei H., Iravani R. A space vector modulated STATCOM based on a three-level neutral point clamped converter // IEEE Trans. Power Deliv., 2007, 22, (2), pp. 1029–1039.
- 104) Tsao-Tsung Ma. Novel Adaptive Control Schemes Based on Online-Trained Fuzzy Neural Networks for the STATCOM // International Review of Electrical Engineering, – 2010 – Vol. 5, – N. 4 – p. 1648–1654.

- 105) Ghazanfar Shahgholian, Jawad Faiz. Static Synchronous Compensator for Improving Performance of Power System: a Review // International Review of Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 5, – N. 5 – p. 2333–2342.
- 106) I. Kumar Yadav, N. Kumar Yadav. Evaluation of Shunt Reactive Power Compensation Evaluation of Shunt Reactive Power Compensation // Journal of Energy and Power Engineering.– 2012 – №6 –p. 784–791.
- 107) A.S.P.Kanojia, B.Dr.V.K.Chandrakar. Damping of Power System Oscillations by using coordinated tuning of POD and PSS with STATCOM // World Academy of Science, Engineering and Technology 50 2009 1067–1072.