

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Уфа Руслан Александрович

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ
ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Гусев Александр Сергеевич

Томск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА АДЕКВАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ЕЕ ПРИЧИНЫ	16
1.1 Свойства и возможности программно-вычислительных комплексов расчета режимов и процессов в электроэнергетических систем со вставками постоянного тока.....	22
1.2 Выводы.....	28
ГЛАВА 2. КОНЦЕПЦИЯ ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И СТРУКТУРА СРЕДСТВ ЕЕ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ.....	29
2.1. Анализ структуры и специфики функционирования вставок постоянного тока	29
2.2 Концепция всережимного адекватного моделирования функционирования вставок постоянного тока в электроэнергетических системах	32
2.3 Структура средств осуществления концепции всережимного моделирования функционирования вставок постоянного тока в электроэнергетических системах	34
2.4 Выводы.....	36
ГЛАВА 3. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ГИБРИДНОГО ПРОЦЕССОРА ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	37
3.1 Гибридный сопроцессор цепи постоянного тока специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока	39
3.2 Гибридный сопроцессор трансформатора связи специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока	41
3.3 Гибридный сопроцессор фильтра высших гармоник специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока	43
3.4 Гибридный сопроцессор фазного реактора специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока	44
3.5 Цифроуправляемые физические модели статического преобразователя напряжения и продольно-поперечного коммутатора.....	45
3.6 Микропроцессорный узел специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока.....	47
3.7 Выводы.....	50

ГЛАВА 4. ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ ВСЕРЕЖИМНОГО АДЕКВАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	52
4.1 Тестовые исследования гибридных сопроцессоров специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока	53
4.1.1 Тестовые исследования гибридного сопроцессора цепи постоянного тока	53
4.1.2 Тестовые исследования гибридного сопроцессора трансформатора связи	59
4.1.3 Тестовые исследования гибридного сопроцессора фильтра высших гармоник.....	62
4.1.4 Тестовые исследования гибридного сопроцессора фазного реактора	64
4.2 Тестовые исследования цифруемых физических моделей специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока.....	68
4.3 Тестовые исследования микропроцессорного узла специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока	69
4.3.1 Тестовые исследования процессора аналого-цифрового преобразования системы автоматического управления.....	70
4.3.2 Тестовые исследования процессора коммутации.....	76
4.4 Выводы.....	81
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДСТВ ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СОСТАВЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	82
5.1. Моделирование процессов объединения несинхронно работающих частей Томской ЭЭС с помощью ВПТ.....	85
5.2. Моделирование процессов регулирования и реверса мощности с помощью с помощью ВПТ	92
5.3. Моделирование влияния функционирования ВПТ на аварийные процессы в ЭЭС	94
5.4. Выводы.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
Список литературы	101
Приложение А. Акты внедрения	112
Приложение Б. Определения масштабных коэффициентов структурных схем ГСП и параметров ЦУАК ЦУ ФМ СПН и ЦУ ФМ ППК.....	114

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

FACTS	– flexible alternative current transmission system (устройства и технологии управления линиями переменного тока);
PMU	– phasor measurement unit (система векторных измерений);
SCADA	– supervisory Control And Data Acquisition (система автоматического контроля и сбора информации);
АД	– асинхронный двигатель;
АЦЦ	– аналого-цифровой преобразователь;
ВКС	– внешняя компьютерная сеть;
ВМК РВ ЭЭС	– Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем;
ВПТ	– вставка постоянного тока;
ВЛ	– воздушная линия электропередачи;
ГСП	– гибридный сопроцессор;
ДПНУ	– динамическая панель наблюдения и управления;
КБ	– конденсаторная батарея;
КЗ	– короткое замыкание;
ИН	– измеритель напряжения;
ИТ	– измеритель тока;
ЛАЧХ	– логарифмическая амплитудно-частотная характеристика;
ЛКС	– локальная компьютерная сеть;
ЛФЧХ	– логарифмическая фазо-частотная характеристика;
МПУ	– микропроцессорный узел;
ОИК	– оперативный информационный комплекс;
ПАЦП	– процессор аналого-цифрового преобразования;
ПВК	– программно-вычислительные комплексы;
ПК	– процессор коммутации;
ППК	– продольно-поперечный коммутатор;
ПС	– подстанция;

ПТС	– программно-технические средства;
Р	– фазный реактор;
РЗА	– релейная защита и автоматика;
САУ	– система автоматического управления;
СПП	– специализированный гибридный процессор;
СД	– синхронный двигатель;
СР	– сглаживающий реактор;
СПН	– статический преобразователь напряжения;
Т	– трансформатор;
ФВГ	– фильтр высших гармоник;
ФМ	– физическая модель;
ЦАП	– цифро-аналоговый преобразователь;
ЦП	– центральный процессор;
ЦПТ	– цепь постоянного тока;
ЦУ ФМ	– цифрууправляемая физическая модель;
ЦУАК	– цифрууправляемый аналоговый ключ;
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция;
ЭЭС	– электроэнергетическая система.

Всережимное моделирование ЭЭС – моделирование ЭЭС, обеспечивающее воспроизведение на неограниченном интервале времени единого спектра квазиустановившихся и переходных процессов при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ЭЭС.

Введение

Актуальность темы исследования.

Современные вставки постоянного тока (ВПТ) со статическими преобразователями напряжения (СПН) на базе силовых быстродействующих полностью управляемых полупроводниковых ключей позволяют эффективно решать ряд актуальных задач в мировой электроэнергетике [1–12]:

- 1) объединение несинхронно работающих электроэнергетических систем (ЭЭС) и их частей;
- 2) ограничение токов короткого замыкания в объединяемых ЭЭС и их частях;
- 3) демпфирование низкочастотных колебаний в ЭЭС и обеспечение колебательной устойчивости их функционирования;
- 4) передачу электроэнергии на постоянном токе.

Согласно отчету CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques - Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения) [13] в настоящее время в мировой электроэнергетике проектируются, строятся и уже эксплуатируются 15 ВПТ, в том числе два проекта, планируемые для реализации в российских ЭЭС [14].

Особенности и специфика функционирования ВПТ значительно изменяют и усложняют процессы в оборудовании и динамические свойства ЭЭС в целом, соответственно условия работы силового оборудования, средств релейной защиты, противоаварийной и технологической автоматики, и порождают актуальную для науки и практики задачу получения, в том числе оперативного, достаточно полной и достоверной информации об этих процессах в ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимой для надежного и эффективного решения вышеуказанных задач на этапах проектирования, исследования, эксплуатации, развития и совершенствования ЭЭС [15–26]. Ввиду недопустимости натурных экспериментов и невозможности из-за сложности современных ЭЭС их адекватного физического моделирования основным путем получения данной

информации служит преимущественно математическое моделирование [26–31]. При этом, обеспечение полноты и достоверности воспроизведения обозначенных процессов связано с необходимостью применения соответствующих моделей, адекватно описывающих единый непрерывный спектр нормальных и аномальных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом. Такие модели ЭЭС, даже без ВПТ, образуют жесткие нелинейные системы дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности, аналитически точно нерешаемые и плохо обусловленные, согласно теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, на условиях применимости методов их численного интегрирования и поэтому подлежащие удовлетворительному решению [32–43].

Единственным способом улучшения этой обусловленности является снижение жесткости, дифференциального порядка и ограничение интервала решения, достигаемые только за счет декомпозиции режимов и процессов в ЭЭС, упрощения математических моделей оборудования и ЭЭС в целом, ограничения интервала воспроизведения процессов [44–51]. При этом, независимо от указанных упрощений и ограничений, всегда неизвестной остается присущая численному интегрированию дифференциальных уравнений методическая ошибка решения, определение которой в теории методов дискретизации дифференциальных уравнений отнесено к категории фундаментальных проблем [32–34].

Совокупность указанных факторов определяет принципиально неразрешимую в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода проблему полноты и достоверности воспроизведения процессов в собственно ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы. Очевидно, что эту проблематику наследуют все используемые в настоящее время многочисленные программно-вычислительные комплексы (ПВК) сугубо численного расчета режимов и процессов в ЭЭС [44–54]. Практическим подтверждением этого служат результаты проведенных совершенно неудовлетворительных

верификаций, в частности при анализе тяжелой системной аварии в Западной энергосистеме США [55, 56], выполненной посредством сопоставления данных специально подготовленного моделирования с помощью ПБК ETMSP с аналогичной натурной информацией, зарегистрированной системой векторных измерений (PMU).

Единственным путем радикального решения обозначенной проблемы может служить только методологически альтернативный существующему комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, позволяющее для каждого аспекта решаемой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом.

Следует отметить, что указанные причины рассмотренной проблемы присущи моделированию любых больших динамических систем и в 1998 г. университетами и научно-исследовательскими центрами США инициирован и ежегодно проводится в индустриально развитых странах специализированный международный симпозиум «Гибридные системы: вычисление и управление» (HSCC) [57].

Степень разработанности темы исследования. Различным аспектам проблемы адекватного моделирования ЭЭС посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых: Александров Г.Н., Аюев Б.И., Бартоломей П.И., Веников В.А., Воропай Н.И., Герасимов А.С., Гусев А.С., Жданов П.С., Кочкин В.И., Кощеев Л.А., Лозинова Н.Г., Погосян Т.А., Поссе А.В., Строев В.А., Шакарян Ю.Г., Шлайфштейн В.А., Andersson G., Povh D., Fang Tian, Fulli G., Retanz C., Sood V.K. и др. Однако, несмотря на это, известные теоретические и практические решения проблемы полноты и достоверности моделирования функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом пока еще далеки от принципиально значимых результатов. Поэтому **идея работы**, посвященная радикальному решению обозначенной проблемы на основе комплексного подхода, несомненно является актуальной для мировой электроэнергетической науки и практики.

Цели и задачи работы.

Целью работы является разработка в соответствии с методологически альтернативным доминирующему одностороннему сугубо численному подходу к моделированию ЭЭС комплексным подходом концепции всережимного адекватного моделирования функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, обеспечивающей достаточно полное и достоверное воспроизведение в реальном времени и на неограниченном интервале единого непрерывного спектра нормальных и аномальных, квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, а также средств реализации этой концепции. Кроме этого, целью данной работы предусмотрено создание экспериментальных средств и проведение исследований, подтверждающих обозначенные свойства и возможности разработанных концепции и средств её осуществления.

Для достижения указанных целей поставлены и решены следующие задачи:

- 1) выявление и обоснование причин существования проблемы адекватного моделирования всережимного функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, а также её принципиальной неразрешимости в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода и направления её радикального решения на основе методологически альтернативного комплексного подхода;
- 2) обоснование и формулирование в соответствии с комплексным подходом концепции всережимного адекватного моделирования функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы;
- 3) разработка структуры средств осуществления предложенной концепции, а также принципов их построения, образующих специализированный гибридный процессор (СГП) для всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ, в том числе в составе аналогично моделируемых ЭЭС;

4) создание экспериментальных средств реализации разработанных концепции и её осуществления;

5) проведение экспериментальных исследований, подтверждающих свойства и возможности разработанных концепции и средств её реализации, необходимые для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом.

Предметом исследования являются нормальные и аномальные, квазиустановившиеся и переходные процессы функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ.

Объектом исследования являются средства всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ.

Научная новизна работы:

1) выявлены и обоснованы причины существования проблемы адекватного моделирования всережимного функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, а также её принципиальная неразрешимость в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода и направление её радикального решения;

2) предложен методологически альтернативный существующему комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, позволяющее для каждого аспекта решаемой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом;

3) обоснована и сформулирована концепция радикального решения проблемы всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в аналогично моделируемых ЭЭС;

4) в соответствии с предложенной концепцией разработаны структура и принципы построения средств её реализации, образующих СГП ВПТ.

Теоретическую значимость работы определяют:

- 1) результаты теоретического обоснования неразрешимости в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода проблемы всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, а также направления её радикального решения на основе методологически альтернативного комплексного подхода;
- 2) обоснованная и сформулированная в соответствии комплексным походом концепция радикального решения проблемы всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в аналогично моделируемых ЭЭС;
- 3) разработанные в соответствии с предложенной концепцией структура и принципы построения средств её реализации.

Практическая значимость работы.

Разработанные средства всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом позволяют получить в реальном времени достаточно полную и достоверную информацию о едином непрерывном спектре квазиустановившихся и переходных процессов в собственно ВПТ и реальной ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимую для надежного и эффективного решения актуальных в мировой электроэнергетике задач: объединения несинхронно работающих ЭЭС и их частей, передачи электроэнергии на постоянном токе, ограничения токов короткого замыкания в объединяемых ЭЭС и их частях; демпфирования низкочастотных колебаний в таких ЭЭС и обеспечения колебательной устойчивости их функционирования, а также связанных с этим задач проектирования, исследования и эксплуатации: оценки условий работы оборудования ВПТ и ЭЭС, включая устройства релейной защиты, автоматики и др.

Методы исследования: теория дифференциального и интегрального исчислений, теория методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, метод непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, теория линейных и нелинейных электрических цепей, теория автоматического регулирования и управления, методы математического и физического моделирования, методы теории точности и чувствительности вычислительных устройств, схемотехника на интегральных микросхемах, экспериментальные методы исследования.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) выявление и обоснование причин существования проблемы адекватного моделирования всережимного функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, а также её принципиальной неразрешимости в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода и направления её радикального решения;
- 2) методологически альтернативный существующему одностороннему сугубо численному моделированию функционирования ВПТ в ЭЭС комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, позволяющее для каждого аспекта этой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом;
- 3) обоснованная и сформулированная концепция радикального решения проблемы всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в аналогично моделируемых ЭЭС;
- 4) результаты разработки и обоснования структуры и принципов построения средств реализации предложенной концепции, образующих СГП ВПТ;
- 5) созданный экспериментальный образец средств всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и реальной ЭЭС с ВПТ, позволяющий получить полную

и достоверную информацию о едином непрерывном спектре нормальных и аномальных, квазиустановившихся и переходных процессов в собственно ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимую для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом;

б) результаты экспериментальных исследований, подтверждающие реализацию теоретически обоснованных свойств и возможностей разработанных средств всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием классических положений и законов теоретической электротехники, математики, теории дифференциального и интегрального исчисления, теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, метода непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, теоретически обоснованных и всесторонне апробированных независимыми исследованиями математических моделей, а также соответствием натурным данным.

Апробация результатов исследований.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на 20 международных и всероссийских научно-технических конференциях и конкурсах, в частности: International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (Малайзия, г. Куала-Лумпур, 2013 г.); 2nd International Conference on Systems and Informatics (Китай, г. Шанхай, 2014 г.); XI International Forum on Strategic Technology (г. Новосибирск: НГТУ, 2016 г.); 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 (г. Челябинск: ЮУрГУ, 2017 г.); IV, V Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2013 г., г. Томск: ТПУ, 2014 г.); Международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение»

(диплом III степени, г. Новосибирск: НГТУ, 2014 г.); VII Международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск: НГТУ, 2015 г.); Научно-практическая конференция «Опыт и перспективы применения силовой электроники и электропередач постоянным током для повышения надежности электрических сетей и реализации международных проектов» (г. Москва: ВВЦ, 2016 г.); Конкурс научно-инновационных проектов Siemens по направлению «Энергоэффективные технологии для инфраструктуры городов» (Диплом I степени г. Москва, 2014 г.).

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 32 печатные работы, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, одно пособие и патент на изобретение.

Личный вклад автора.

Основные результаты работы, связанные с анализом, выявлением и обоснованием проблемы полноты и достоверности моделирования функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, направления её решения, а также разработкой концепции всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, структуры и принципов построения средств её реализации, созданием экспериментальных средств и проведением исследований, подтверждающих определяемые концепцией свойства и возможности, получены лично автором диссертационной работы.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении государственных контрактов: Соглашение на предоставление гранта от 20.09.2012 г. № 14.В37.21.1506 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы» на тему: «Разработка и экспериментальные исследования программно-аппаратных элементов блока моделирования автоматизированной системы интеллектуального управления высоковольтного преобразовательного

комплекса на базе вставки постоянного тока»; Гос.задание № 3901 от 01.01.2016 г. «Разработка и исследование гибридной модели вставки несинхронной связи электроэнергетических систем».

Кроме этого, необходимость результатов работы для обоснованного выбора средств объединения отдельно работающих частей Томской ЭЭС и оценки режимных условий этого объединения, создания передач постоянного тока, ограничения токов короткого замыкания, демпфирования низкочастотных колебаний и обеспечения колебательной устойчивости функционирования ЭЭС подтверждена актами использования результатов данной диссертационной работы [Приложение А].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из списка сокращений и терминов, введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 96 наименований, содержащих 120 страниц, 4 таблицы, 60 рисунков, а также двух приложений на 9 страницах.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА АДЕКВАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ЕЕ ПРИЧИНЫ

В силу непрерывности и параллельности генерации, преобразования, распределения и потребления электроэнергии всё участвующее в данном процессе оборудование (первичные двигатели, генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, вставки постоянного тока (ВПТ), разнообразные электропотребители и множество другого основного и вспомогательного оборудования электроэнергетической системы (ЭЭС)) постоянно связано между собой единым непрерывным спектром квазиустановившихся и переходных процессов при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы. Поэтому, надежность и эффективность решения многих важнейших задач проектирования, исследования и эксплуатации ВПТ, другого оборудования и ЭЭС с ВПТ в целом зависит от полноты и достоверности используемой при этом информации об этих процессах.

Известная специфика ЭЭС исключает возможность получения всей необходимой информации, особенно аварийного характера, натурным путем, а ввиду чрезвычайной сложности современных ЭЭС оказывается невозможным их полноценное физическое моделирование. Поэтому основным способом получения обозначенной информации служит математическое моделирование.

Однако подавляющее большинство оборудования ЭЭС представляет собой сложные динамические элементы, к тому же преимущественно нелинейные с весьма значительным диапазоном постоянных времени ($>10^3$), и адекватная математическая модель любой реальной ЭЭС всегда содержит жесткую (отношение наибольшей постоянной времени к наименьшей >10), нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности, которая согласно теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений плохо обусловлена на условиях применимости методов их численного интегрирования [32–43]:

1) условие Липшица:

$$\left| f(t, y_n) - f(t, y_j) \right| \leq L |y_n - y_j|, \quad (1.1)$$

где y_n, y_j – любая пара значений из области решения дифференциального уравнения $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$; L – константа Липшица (или логарифмическая норма матрицы Якоби).

Данное соотношение определяет равномерную и непрерывную ограниченность производных в области решения, соответствующую достаточной гладкости и монотонности интегральных кривых. Между тем, для большинства интегральных кривых многих процессов ЭЭС, особенно электромагнитной стадии аварийных процессов, это плохо выполняющееся условие.

Система дифференциальных уравнений считается жесткой, если спектральный радиус (коэффициент жесткости) [35–40]:

$$S(t) = \frac{\max_{n=1, \dots, m} |\operatorname{Re} \lambda_n|}{\min_{n=1, \dots, m} |\operatorname{Re} \lambda_n|} \geq 10, \quad (1.2)$$

где λ_n – собственное значение матрицы Якоби.

Физическим аналогом коэффициента жесткости является отношение максимальной и минимальной постоянных времени, которое в адекватной математической модели любой реальной ЭЭС превышает 10^3 .

2) применение в большинстве методов численного интегрирования дифференциальных уравнений усеченного ряда Тейлора предполагает разложимость решения в данный ряд в окрестности каждой точки дискретизации:

$$y(t) = R_n(t) + r_n(t), \quad (1.3)$$

где $R_n(t) = \sum_{p=0}^n \frac{y^{(p)}(t_n)}{p!} (t - t_n)^p$ – усеченная часть степенного ряда Тейлора,

используемая в качестве аппроксимирующего выражения; $y^{(p)}(t_n) = \frac{d^p y}{dt^p} \Big|_{t=t_n}$; p –

порядок согласованности (аппроксимации); $t_n = t_0 + nh$, – точки дискретизации;

$n = 0, 1, \dots, N-1$, t_0 – точка начала интервала интегрирования; h – шаг дискретизации (интегрирования); $r_n(t)$ – остаточный член.

Между тем, далеко не все, даже весьма простые функции, а тем более интегральные кривые различных процессов в ЭЭС, раскладываются в ряд Тейлора [37, 43]. Кроме того, для указанных систем дифференциальных уравнений разложимость в ряд Тейлора недоказуема и на практике никогда не осуществляется (делается предположение о надлежащей дифференцируемости на интервале интегрирования: функция и её производные любого порядка должны быть непрерывными на воспроизводимом интервале; степенной ряд сходится к аппроксимирующей функции ($\lim_{n \rightarrow \infty} R_n(t) = y(t)$) и значение остаточного члена ($\lim_{n \rightarrow \infty} r_n(t) = 0$).

3) методы дискретизации для дифференциальных уравнений должны быть согласованными:

$$d = \max |\tilde{y}(t_n) - y(t_n)| \rightarrow O(h^p), \text{ при } h \rightarrow 0 \quad (1.4)$$

где d – локальная ошибка аппроксимации; $O(h^p)$ – ошибка за счет отбрасывания членов ряда Тейлора при его усечении; $\tilde{y}(t_n)$ – решение дифференциального уравнения $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$ в точке t_n , полученное путем численного интегрирования; $y(t_n)$ – действительное решение дифференциального уравнения $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$ в данной точке.

Поскольку согласованность предполагает усечение ряда Тейлора, то и здесь возникает та же практически трудноразрешимая задача реальной оценки значения $r_n(t)$. Кроме того, ошибка $O(h^p)$ определена при $h \rightarrow 0$, что всегда расходится с действительностью, так как в реальности неизбежно $h > 0$, в том числе с учетом ошибки округления вычислительных средств. В результате, достоверность $O(h^p)$ и целесообразность ориентации на нее, при выполнении численных расчетов, также оказывается под вопросом [37].

4) решение дифференциальных уравнений должно быть ограничено, как минимум, условием нуль-устойчивости, гарантирующим устойчивое развитие погрешности, в соответствии с которым корни ξ_i характеристического полинома аппроксимирующего выражения (1) должны удовлетворять требованиям: для всех корней $|\xi_i| \leq 1$, корни $|\xi_i| = 1$ должны быть обязательно простыми [32, 34],

$$P(\xi) = \sum_{v=0}^k a_v \xi^v, \quad (1.5)$$

где k – порядок метода численного интегрирования; a_v – коэффициенты характеристического полинома; $i = 0, 1, \dots, k-1$.

Кроме того для достижения более сильной, теоретически абсолютной устойчивости многошаговые методы должны быть неявными и не выше второго порядка, что обычно в программно-вычислительных комплексах (ПВК) расчета режимов и процессов в ЭЭС тоже не соблюдается [35, 36].

5) согласно теореме Далквиста интервал решения всегда ограничен [41, 42]:

$$|\tilde{y}(t_n) - y(t_n)| \leq \frac{G}{1 - \left| h \frac{b_k}{a_k} \right| \cdot M} \left[\left(1 + \left| h \frac{b_k}{a_k} \right| \cdot M \right) d + \frac{t_n}{|a_k|} \left(\frac{\sigma}{h} + Kh^p \right) \right] \cdot e^{Gh t_n}, \quad (1.6)$$

где a_k, b_k – коэффициенты, определяемые аппроксимирующим многочленом конкретного метода численного интегрирования, причем если $b_k = 0$ и $a_k \neq 0$ то метод явный, а если $b_k \neq 0$ и $a_k \neq 0$ то метод неявный; $\sigma = \max |\sigma_n|$ – ошибка округления вычислительных средств, определяемая разрядной сеткой используемого компьютера; G – постоянная, определяемая локальной ошибкой аппроксимации (d) из неравенства $\frac{|\tilde{y}_n - y_n|}{d} < G$; M – постоянная, определяемая собственными значениями матрицы Якоби (λ_n) из неравенства $|\lambda_n M| < 1$; K – постоянная, определяемая порядком аппроксимации (p) из неравенства $|y^{(p+1)}(t)| < K$.

Вышеприведенные условия и их характеристика показывают, что адекватная математическая модель любой реальной ЭЭС плохо обусловлена на условиях применимости методов ее численного решения и удовлетворительно решена быть не может.

Единственным способом улучшения рассмотренной обусловленности является снижение жесткости, дифференциального порядка, ограничение интервала решения, которое может быть достигнуто только за счет существенного упрощения математических моделей оборудования, ЭЭС в целом и ограничения интервала воспроизведения процессов, применяемых в различной мере во всех современных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС [44–54]:

1) декомпозиция единого и непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом, предполагающая условное разделение и выделение установившихся и различных стадий переходных процессов, рассчитываемых с помощью различных математических моделей и методов;

2) упрощения математических моделей оборудования ЭЭС, особенно электросетевого, включая ВПТ, представляемого обычно статическими моделями в виде соответствующих алгебраических уравнений, и использование однолинейных расчетных схем, а в случае несимметричных режимов – метода симметричных составляющих;

3) ограничение интервала воспроизведения процессов и использование шага расчета, неприемлемого для моделирования быстротекущих и особенно различных коммутационных процессов;

При этом независимо от указанных упрощений и ограничений всегда неизвестной остается присущая численному интегрированию дифференциальных уравнений методическая ошибка решения, определение которой отнесено в теории методов дискретизации дифференциальных уравнений к категории фундаментальных проблем [32, 33].

В теории и практике такого рода расчетов для анализа возможности получения решений и их приемлемости обычно используются полуэмпирические

формулы оценки прогнозируемой ошибки [35, 36]. Такая всесторонне исследованная и апробированная формула, рекомендованная для оценки возможной ошибки во всех случаях практических численных расчетов процессов в ЭЭС, приведена в [58, 59]

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^m e^{\lambda_n h_n} (d_n + \sigma_n), \quad (1.7)$$

где λ_n – собственное значение матрицы Якоби решаемой системы дифференциальных уравнений, являющееся по существу коэффициентом чувствительности к ошибке на n -ом шаге решения (h_n); d_n – локальная (на шаге) методическая ошибка; m – общее число пошаговых вычислений в решаемой системе уравнений на интервале воспроизведения процессов; σ_n – ошибка округления, определяемая разрядной сеткой компьютера.

Данная формула позволяет также оценить вышеобозначенную проблематику на примере определения возможной ошибки численного решения системы дифференциальных уравнений адекватной математической модели средней по величине ЭЭС (в частности Томской ЭЭС, используемой в дальнейшем для экспериментальных исследований разработанных средств всережимного моделирования функционирования ВПТ в ЭЭС), дифференциальный порядок которой примерно $N \approx 5 \cdot 10^3$, на наиболее часто используемом в ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС интервале решения $t_u \leq 20$ с [60] с предельно малым и пока нереализуемым шагом интегрирования $h_n = \text{const} = 10^{-5}$ с, а также с $\lambda_n = 0$ (нежесткая система уравнений), пренебрежимо малой методической ошибкой на шаге численного интегрирования $d_n = \text{const} = 10^{-10} \cdot 100\%$ и бесконечно большой разрядной сеткой компьютера $\sigma_n = 0$:

$$\varepsilon = \frac{t_u}{h_n} \cdot N \cdot d_n \approx \frac{20}{10^{-5}} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-10} \cdot 100\% \approx 100\% \quad (1.8)$$

Из приведенного примера видно, что при данных, практически идеальных условиях, ошибка собственно численного решения системы дифференциальных уравнений оказывается совершенно неприемлемой, для уменьшения которой

необходимы значительные упрощения и ограничения математических моделей оборудования, ЭЭС в целом и условий их решения, ведущие к еще большему снижению полноты и достоверности моделирования процессов даже в сравнительно небольших реальных традиционных ЭЭС.

Особенности оборудования и специфика функционирования ВПТ на базе статического преобразователя напряжения (СПН) (непрерывное функционирование при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ЭЭС; междуфазный режим работы СПН и быстродействие полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей, время переключения которых составляет (1–3) мкс), определяют соответствующую этим характеристикам математическую модель ВПТ, которая еще более усугубляет обозначенную проблему адекватного моделирования ЭЭС тем более, что при этом необходимо динамически моделировать и электрическую сеть ЭЭС.

Рассмотренные проблематика и причины ее существования являются теоретически строгим объективным обоснованием необходимости применения во всех без исключения ПВК численных расчётов режимов и процессов в ЭЭС указанных упрощений и ограничений, принципиально неприемлемых при воспроизведении процессов в ВПТ в ЭЭС и в ЭЭС с ВПТ в целом.

1.1 Свойства и возможности программно-вычислительных комплексов расчета режимов и процессов в электроэнергетических системах со вставками постоянного тока

В настоящее время одним из наиболее распространенных в электроэнергетике, в том числе российской, средством моделирования и анализа режимов и процессов в ЭЭС является программно-вычислительный комплекс (ПВК) EUROSTAG.

В ПВК EUROSTAG исходными данными для расчета переходных процессов в ЭЭС являются результаты расчета установившегося режима, осуществляемого методом Ньютона-Рафсона (например, при моделировании ЭЭС с ВПТ

осуществляется расчет алгебраических уравнений для определения углов «зажигания» (α) и «погасания» (γ) силовых ключей статических преобразователей напряжения (СПН) в начальный момент времени, а также коэффициента трансформации трансформаторов связи ВПТ [21, 29, 51, 61, 62]).

Расчет переходных процессов производится методом пошагового численного интегрирования Нордсика, который, по комментариям автора, представляет собой метод Адамса с фиксированным порядком аппроксимирующего полинома, благодаря чему оценка изменения ошибки на шаге интегрирования становится зависимой, главным образом, от его значения, что упрощает управление им и интервалом решения, позволяющим при воспроизведении монотонных процессов существенно увеличивать интервал решения [39].

Согласно описанию ПВК EUROSTAG [29], а также анализу работ, посвященных моделированию ВПТ с помощью ПВК EUROSTAG [21, 51, 61, 62], модель ВПТ реализуется посредством фиктивных, не имеющих физических аналогов, управляемых инжекторов, которые вводят в узел подключения дополнительный ток (рис.1.1). Управление инжекторами, а соответственно моделирование системы автоматического управления ВПТ, осуществляется посредством макроблоков (рис.1.2–1.5).

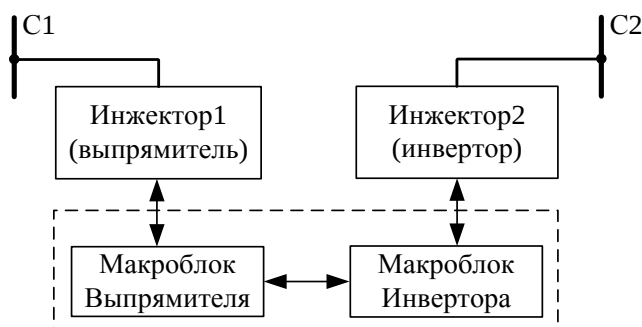


Рисунок 1.1 – Структурная схема модели вставки постоянного тока (ВПТ) в среде ПВК EUROSTAG, где C1 и C2 – узлы примыкающей статически моделируемой электрической сети

Использование обозначенной модели позволяет лишь воспроизводить режимы в ЭЭС с ВПТ без учета процессов в ВПТ и их влияния на процессы в ЭЭС в целом [21, 51, 61, 62]. В частности, анализ применения данной модели

показывает, что при моделировании близких коротких замыканий для воспроизведения перевода ВПТ в режим автономной работы и др., указанные процессы воспроизводятся имитационным способом (например, созданием фиктивной связи между шинами переменного тока выпрямителя и инвертора ВПТ), не содержащим информации об этих процессах, а используемые для моделирования ВПТ инжекторы оказываются абсолютно пассивными элементами [21].

а)

б)

Рисунок 1.2 – Диалоговое окно задания параметров СПН, работающего в режиме выпрямителя (а) и инвертора (б)

а)

б)

Рисунок 1.3 – Диалоговое окно задания параметров макроблоков СПН, работающего в режиме выпрямителя (а) и инвертора (б)

В отличие от ПВК EUROSTAG библиотеки других ПВК (PSCAD, EMTP-RV, PSS/E и др.) содержат достаточно детальные математические модели

оборудования ВПТ: математические модели трансформаторов связи, фазных реакторов, фильтров высших гармоник, цепи постоянного тока, и СПН. Силовые ключи СПН моделируются в виде идеальных ключей с нелинейными сопротивлениями, позволяющими учитывать их ВАХ. Однако использование подобных моделей ВПТ имеет смысл при соответствующем динамическом моделировании электрической сети и ЭЭС в целом, которое силу обозначенных ранее причин оказывается невозможным для реальных ЭЭС.

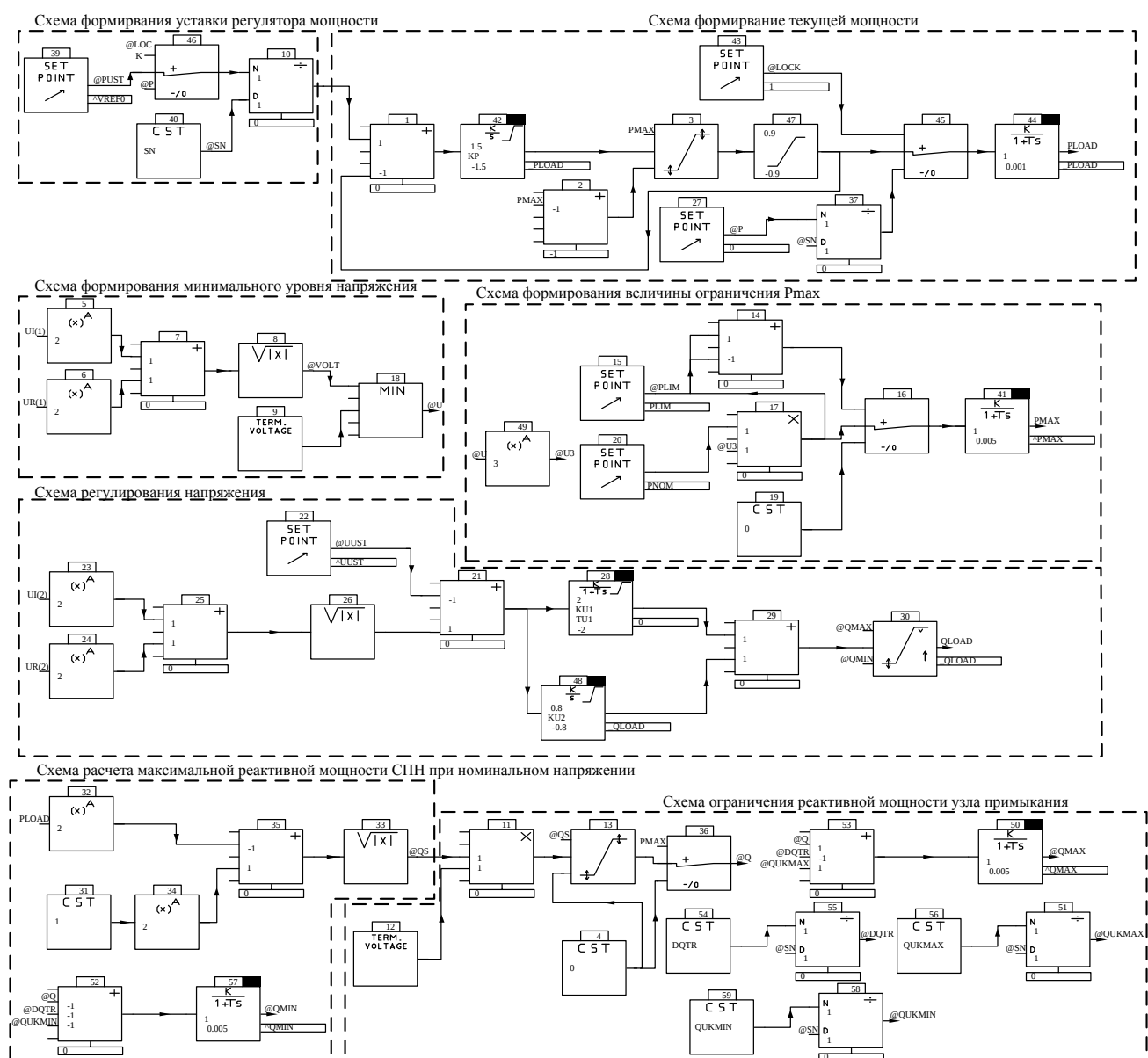


Рисунок 1.4 – Структурная схема макроблока статического преобразователя напряжения (СПН), работающего в режиме выпрямителя

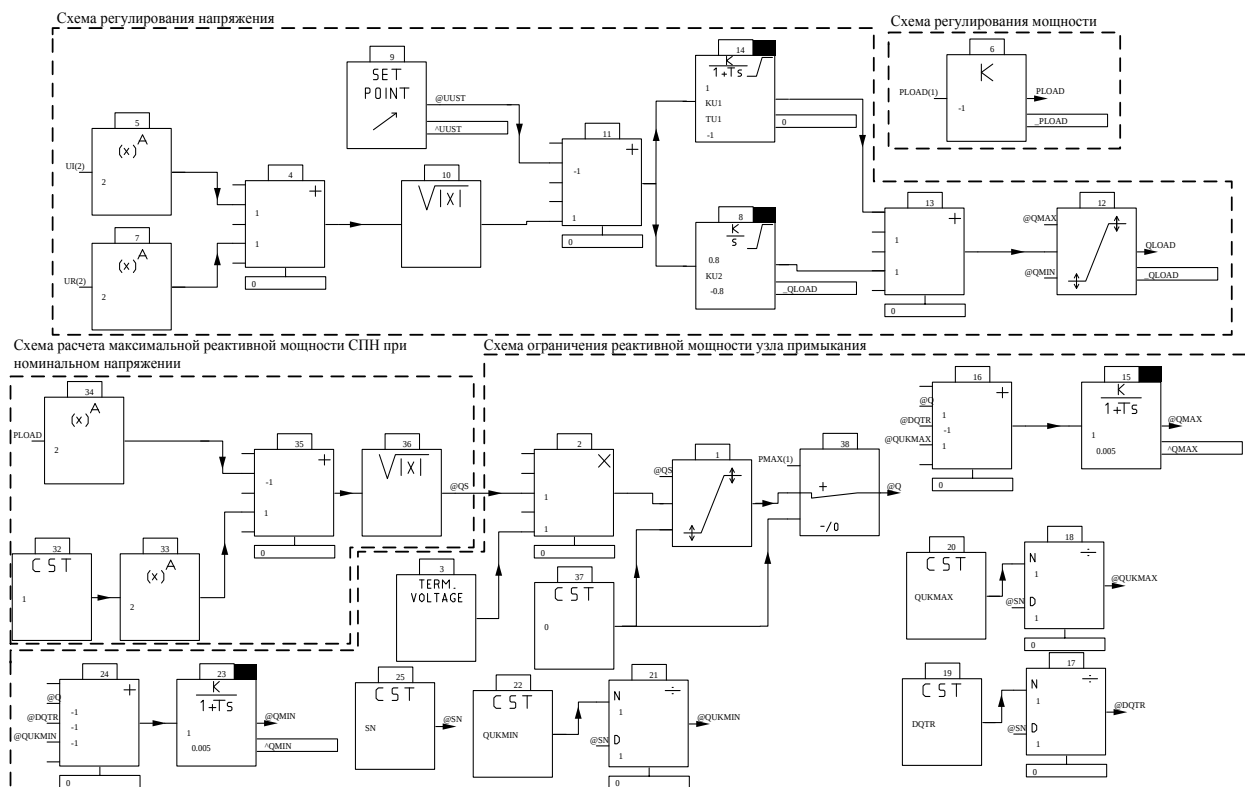


Рисунок 1.5 – Структурная схема макроблока статического преобразователя напряжения (СПН), работающего в режиме инвертора

Таким образом, во всех ПВК расчета режимов и процессов в реальных ЭЭС становится неизбежным применение указанных упрощений и ограничений при моделировании ВПТ в ЭЭС [27, 31, 44-54]:

- 1) упрощение математических моделей оборудования ЭЭС, особенно электросетевого, представляемого обычно статическими моделями, использование однолинейных расчетных схем и метода симметричных составляющих;
- 2) применение моделей ВПТ в виде управляемых источников;
- 3) использование шага расчета ≥ 50 мкс, не позволяющего адекватно воспроизводить коммутационные процессы в ВПТ.

Помимо указанных упрощений и ограничений рассмотренные ПВК не позволяют осуществлять моделирование процессов в ЭЭС в реальном времени. Возможности известных средств трехфазного численного моделирования в реальном времени электромагнитных и электромеханических переходных

процессов: RTDS Technologies Inc., Канада, eMEGAsim, OPAL-RT, Канада, также ограничены условиями применимости методов численного интегрирования дифференциальных уравнений.

В связи с вышеизложенным проблема получения, в том числе оперативного, достаточно полной и достоверной информации о едином непрерывном спектре квазиустановившихся и переходных процессах в ВПТ и ЭЭС в целом не имеет никаких перспектив ее решения в рамках существующего методологически одностороннего сугубо численного подхода.

Данный теоретически обоснованный и подтвержденный свойствами и возможностями существующих ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС вывод соответствует проведенным в России [50, 63-65] и за рубежом специально подготовленным верификациям современных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, в частности опубликованным в [53, 54] результатам анализа системной аварии в Западной энергосистеме США, выполненного с помощью ПВК ETMSP и натурных данных (рис. 1.6).

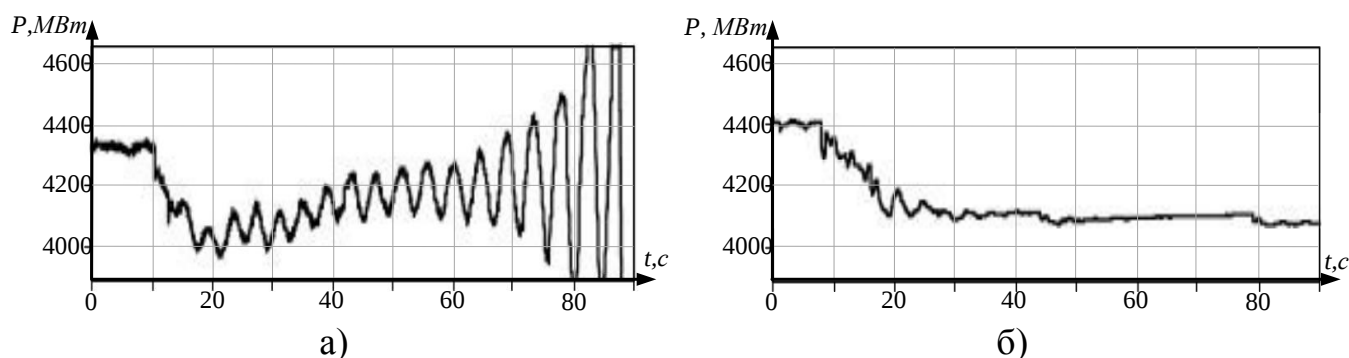


Рисунок 1.6 – Изменение перетока мощности в линии электропередачи постоянного тока в реальности (а) и результаты моделирования с помощью ПВК ETMSP (б)

Одной из основных причин неудовлетворительных результатов подобных верификаций отмечаются применения вышеуказанных упрощений моделей оборудования ВПТ, систем их автоматического управления и др.

Актуальность обозначенной проблемы подтверждает также состояние важнейшего показателя надежности ЭЭС – статистики аварийности в мировой

электроэнергетике [66, 67], согласно которой 50% тяжелых аварий происходит из-за неправильных действий релейной защиты, автоматики и ошибочных или запоздалых действий диспетчерского персонала, главной причиной которых является использование недостаточно полной и достоверной информации о процессах в оборудовании и ЭЭС, получаемой, как уже отмечалось, преимущественно с помощью указанных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС.

Обобщением вышеизложенного является обоснованная констатация указанной ранее принципиальной неразрешимости в рамках сугубо численного моделирования ЭЭС и единственным путем её решения может служить только комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, позволяющее для каждого аспекта решаемой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом.

1.2 Выводы

1. Достаточно полное и достоверное моделирование процессов в оборудовании и ЭЭС в целом, особенно содержащих ВПТ и другие устройства FACTS, при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы представляет собой сложную и актуальную для проектирования, исследования, эксплуатации, совершенствования и развития ЭЭС проблему, решение которой в рамках существующего методологически одностороннего сугубо численного подхода к моделированию ЭЭС оказывается принципиально невозможным.

2. Единственным путем радикального решения обозначенной проблемы может быть только альтернативный существующему комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, позволяющее для каждого аспекта этой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом.

ГЛАВА 2. КОНЦЕПЦИЯ ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И СТРУКТУРА СРЕДСТВ ЕЕ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Согласно комплексному подходу положения концепции всережимного адекватного моделирования функционирования вставок постоянного тока (ВПТ) в электроэнергетических системах (ЭЭС) базируются на основе анализа структуры и специфики функционирования оборудования и ВПТ в целом, а также методов и средств их достаточно полного и достоверного моделирования в ЭЭС при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы.

2.1. Анализ структуры и специфики функционирования вставок постоянного тока

Наиболее эффективным и перспективным вариантом в мировой, в том числе российской, электроэнергетике является ВПТ со статическими преобразователями напряжения (СПН) на базе быстродействующих полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей (запираемые GTO тиристоры (Gate Turn-Off), биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)) [70–75], обобщенная структура которой приведена на рисунке 2.1.

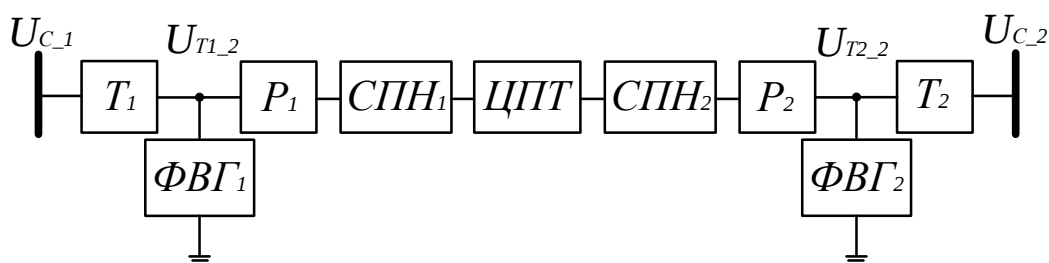


Рисунок 2.1 – Структурная схема вставки постоянного тока (ВПТ), где T_1 и T_2 – трансформаторы связи, $ФВГ_1$ и $ФВГ_2$ – фильтры высших гармоник, P_1 и P_2 – фазные реакторы, $СПН_1$ и $СПН_2$ – статические преобразователи напряжения, $ЦПТ$ – цепь постоянного тока

Одной из наиболее оптимальных топологий СПН, в том числе принятой для внедрения в России, является трехуровневая схема с активной фиксированной нейтралью (Active Neutral Point Clamped, ANPC), структура которой приведена на рисунке 2.2 [76].

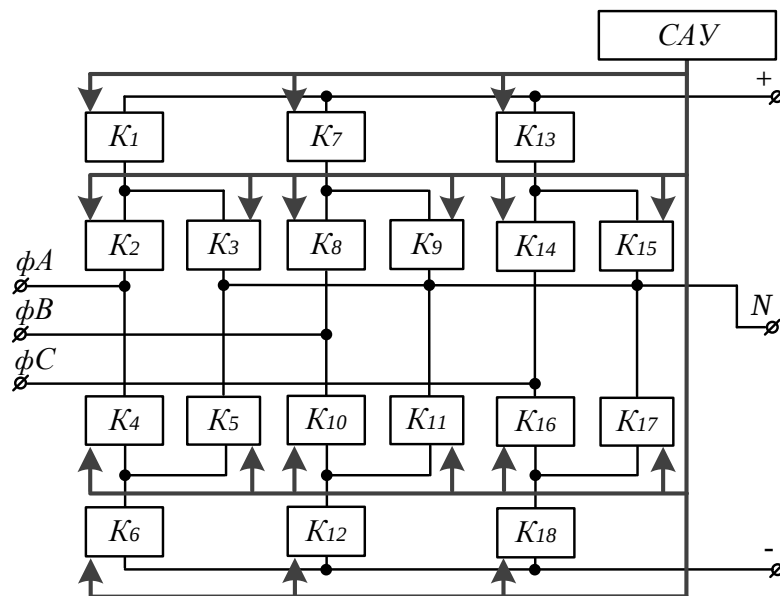


Рисунок 2.2 – Трехуровневая схема статического преобразователя напряжения (СПН), где K_{1-18} – быстродействующие полностью управляемые силовые полупроводниковые ключи, САУ – микропроцессорная система автоматического управления

Благодаря использованию быстродействующих полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей и соответствующих алгоритмов САУ осуществляются необходимые функции управляемого выпрямления и инвертирования СПН, обеспечивающие независимое управление активной и реактивной мощностью, соответственно функционирование СПН во всех 4 квадрантах диаграммы мощности.

Ввиду отсутствия надежных теоретических основ для синтеза адекватных математических моделей, достаточно полно и достоверно описывающих спектр коммутационных процессов силовых полупроводниковых ключей, наиболее эффективным и адекватным является их воспроизведение на модельном физическом уровне с помощью цифруемых аналоговых ключей (ЦУАК).

Согласно реальной реализации микропроцессорной САУ СПН ВПТ её моделирование целесообразно осуществлять также посредством соответствующих алгоритмов, воспроизводимых на цифровом уровне.

Каждый из полюсов представленной на рисунке 2.3 обобщенной структурной схемы ЦПТ ВПТ содержит конденсаторные батареи (КБ), предназначенные для аккумуляции и передачи электрической мощности с требуемым уровнем напряжения для обеспечения функций регулирования активной и реактивной мощности, а также сглаживающие реакторы (СР) для ограничения, сглаживания тока и предотвращения резонансных явлений [10, 19, 70–75].

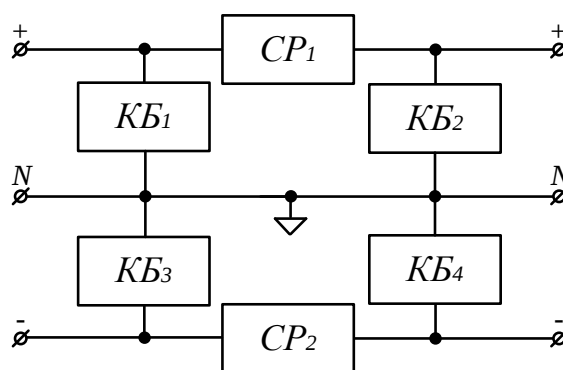


Рисунок 2.3 – Структурная схема цепи постоянного тока (ЦПТ)

Весь спектр значимых процессов в каждом элементе и в ЦПТ в целом полно и достоверно описывается теоретически строго обоснованными и надежно проверенными системами дифференциальных уравнений, поэтому данные элементы адекватно воспроизводятся путем математического моделирования.

Кроме рассмотренного оборудования структура ВПТ (рис. 2.1) содержит Р, предназначенные для ограничения тока короткого замыкания, непрерывный спектр всевозможных процессов в каждом из которых достоверно воспроизводится соответствующим дифференциальным уравнением.

Трехуровневая топология СПН обуславливает наличие в инвертируемом напряжении высших гармоник, для фильтрации которых в структуре ВПТ предусматриваются RLC-фильтры (рис. 2.4)

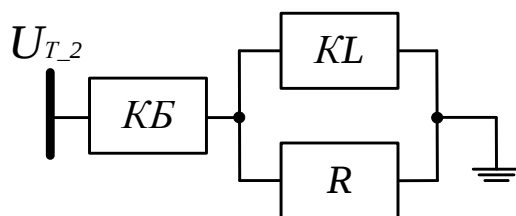


Рисунок 2.4 – Структурная схема фильтра высших гармоник (ФВГ), где R – резистор, $КБ$ – конденсаторная батарея, $КЛ$ – катушка индуктивности

Очевидно, что непрерывный спектр всевозможных процессов в такого рода ФВГ тоже достоверно воспроизводится соответствующей математической моделью.

Весь спектр нормальных и аномальных процессов в Т, используемых в ВПТ для обеспечения допустимого для силовых полупроводниковых ключей СПН напряжения, также достаточно полно и достоверно описывается известной строго обоснованной системой дифференциальных уравнений.

Ввиду ранее обозначенной проблемы адекватного математического воспроизведения коммутационных процессов, моделирование различных коммутаций линейных выключателей и разнообразных коротких замыканий тоже целесообразно осуществлять на модельном физическом уровне с помощью ЦУАК.

2.2 Концепция всережимного адекватного моделирования функционирования вставок постоянного тока в электроэнергетических системах

Анализ структуры, специфики функционирования оборудования и ВПТ в целом, в том числе с точки зрения адекватности моделирования, и ранее указанный комплексный подход позволяют обосновано сформулировать положения концепции всережимного моделирования функционирования ВПТ, адаптированной для аналогичного моделирования ЭЭС с ВПТ в целом, реализуемого посредством Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) [77–81]:

1) для оборудования ВПТ, не содержащего коммутационные элементы, обосновываются и синтезируются всережимные бездекомпозиционные математические модели, достаточно полно и достоверно воспроизводящие единый непрерывный спектр квазиустановившихся и переходных процессов при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах его работы;

2) применяется способ методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале систем дифференциальных уравнений синтезированных математических моделей оборудования ВПТ: трансформаторов связи, фильтров высших гармоник, фазных реакторов, цепи постоянного тока;

3) для осуществления способа методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования ВПТ разрабатываются и используются специализированные параллельные цифро-аналоговые структуры;

4) разрабатывается и применяется соответствующая топологии воспроизводимого СПН цифруправляемая физическая модель (ЦУ ФМ СПН) на базе ЦУАК, обеспечивающая адекватное воспроизведение коммутаций силовых полупроводниковых ключей и спектра всевозможных процессов в СПН в целом;

5) разрабатывается и применяется цифруправляемая физическая модель продольно-поперечного трёхфазного коммутатора (ЦУ ФМ ППК) на базе ЦУАК, обеспечивающая адекватное воспроизведение в ВПТ всевозможных продольных и поперечных трехфазных коммутаций, включая пофазные, необходимых для моделирования функционирования линейных выключателей и различных коротких замыканий;

6) представленные мгновенными значениями напряжений непрерывные математические переменные входных/выходных токов специализированных параллельных цифро-аналоговых структур непрерывного методически точного решения в реальном времени систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования ВПТ преобразуются с помощью

преобразования напряжение-ток в соответствующие им модельные физические токи и взаимодействие этих структур с ЦУ ФМ СПН, ЦУ ФМ ППК, а также моделируемого ВПТ в аналогично моделируемых ЭЭС в целом с помощью Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) осуществляется на модельном физическом уровне;

7) все информационно-управляющие функции, включая моделирование САУ ВПТ (управление состоянием ЦУАК ЦУ ФМ СПН), релейной защиты ВПТ, автоматизированное и автоматическое управление, в том числе функциональное, параметрами математически моделируемого оборудования ВПТ, управление состоянием ЦУАК ЦУ ФМ ППК, функциональное преобразование и отображение информации осуществляются посредством цифро-аналогового, аналого-цифрового преобразований и IT-технологий;

8) для обеспечения необходимого уровня информационно-управляющих возможностей и гарантированной необходимой инструментальной точности моделирования все разработанные программно-аппаратные средства всережимного моделирования в реальном времени ВПТ реализуются на базе современной интегральной микроэлектроники и микропроцессорной техники.

2.3 Структура средств осуществления концепции всережимного моделирования функционирования вставок постоянного тока в электроэнергетических системах

Представленная ранее структурная схема ВПТ и положения выше приведенной концепции определяют структуру средств осуществления этой концепции, образующую специализированный гибридный процессор (СПП) для всережимного моделирования в реальном времени ВПТ, которая с учетом ее применения в ранее указанном ВМК РВ ЭЭС приведена на рисунке 2.5:

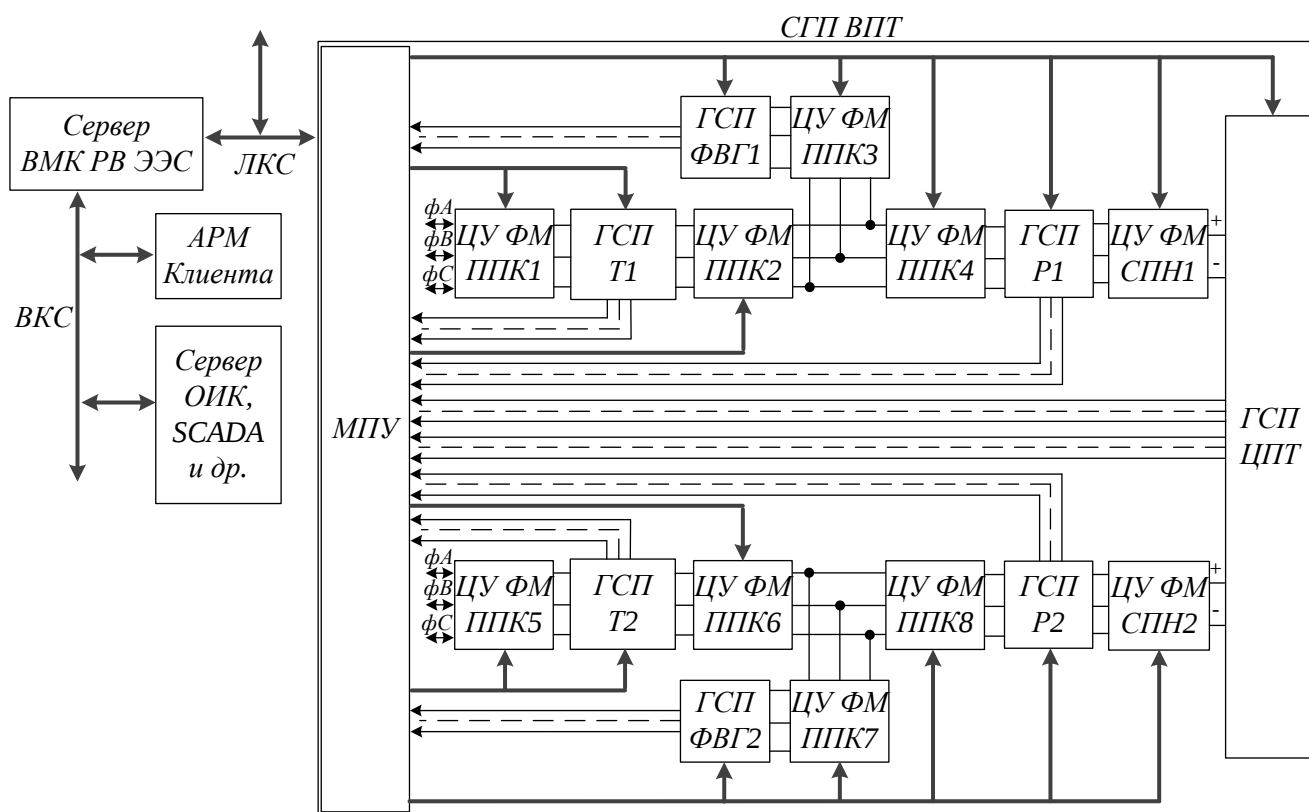


Рисунок 2.5 – Структурная схема СГП ВПТ

Гибридные сопроцессоры (ГСП) трансформаторов связи (Т), фильтров высших гармоник (ФВГ), фазных реакторов (Р) и цепи постоянного тока (ЦПТ) представляют собой соответствующие решаемым системам дифференциальных уравнений математических моделей этого оборудования параллельные цифро-аналоговые структуры методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале данных систем с цифровым управлением, в том числе функциональным, параметрами математических моделей и преобразованием представленных мгновенными значениями напряжений непрерывных математических переменных входных-выходных токов с помощью преобразователей напряжение-ток (u/i) в соответствующие им модельные физические токи.

Модельные физические входы/выходы ГСП объединяются согласно структурной схеме ВПТ с выполненными на базе ЦУАК цифрууправляемыми физическими моделями продольно-поперечных коммутаторов (ЦУ ФМ ППК1-8)

благодаря чему обеспечивается адекватное воспроизведение всевозможных коммутационных процессов оборудования ВПТ и ВПТ в ЭЭС в целом.

Необходимость реализации в реальном времени алгоритмов САУ ВПТ, релейной защиты, аналого-цифрового преобразования (АЦП), оперативного управления ЦУ ФМ ППК и осуществление множества других информационно-управляющих функций предопределяет их разделение и выполнение с помощью нескольких АЦП и взаимодействующих микропроцессоров, специально ориентированных на это распределение и образующих соответствующий микропроцессорный узел (МПУ).

В структуре ВМК РВ ЭЭС естественное функциональное взаимодействие СГП ВПТ в узлах ЭЭС обеспечивается, как уже отмечалось, на модельном физическом уровне, а информационно-управляющее взаимодействие осуществляется посредством центрального процессора МПУ, связанного по локальной компьютерной сети (ЛКС) с Сервером ВМК РВ ЭЭС, взаимодействующим также по внешней компьютерной сети (ВКС) с автоматизированным рабочим местом клиента (пользователя) ВМК РВ ЭЭС (АРМ Клиента) и внешними программно-техническими средствами (Сервер ОИК, SCADA и др.).

2.4 Выводы

Разработанные на основе результатов анализа структуры, специфики функционирования оборудования и ВПТ в целом концепция всережимного моделирования функционирования ВПТ в ЭЭС и образующая СГП ВПТ структура программно-аппаратных средств ее осуществления позволяют принципиально исключить все причины, препятствующие достаточному полному и достоверному моделированию в реальном времени и на неограниченном интервале единого непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ВПТ в целом, в том числе в составе ЭЭС, при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы.

ГЛАВА 3. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ГИБРИДНОГО ПРОЦЕССОРА ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Согласно представленным ранее анализу структуры, специфики функционирования оборудования и вставки постоянного тока (ВПТ) в целом, положениям концепции всережимного моделирования функционирования ВПТ в электроэнергетических системах (ЭЭС) и структуре средств осуществления этой концепции, образующей специализированный гибридный процессор (СГП) ВПТ, оборудование ВПТ, не содержащее коммутационные элементы (трансформаторы связи (Т), фильтры высших гармоник (ФВГ), фазные реакторы (Р), цепь постоянного тока (ЦПТ)), наиболее эффективно и адекватно воспроизводятся путем математического моделирования, реализуемого посредством специализированных параллельных цифро-аналоговых структур методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале систем дифференциальных уравнений математических моделей этого оборудования ВПТ с цифровым управлением, в том числе функциональным, параметрами данных математических моделей, осуществляемого путем цифро-аналогового преобразования, и преобразованием представленных мгновенными значениями напряжений непрерывных математических переменных входных-выходных токов в соответствующие им модельные физические токи. Каждая из этих структур в совокупности с преобразователями напряжение-ток (u/i) составляют соответствующий гибридный сопроцессор (ГСП) СГП ВПТ и ориентирована на применение в их реализации интегральной микроэлектронной элементной базы: интегральных операционных усилителей в инвертирующем включении, в том числе на выходе интегральной резистивной матрицы цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), за исключением повторителей напряжения.

Ввиду обозначенной ранее проблемы адекватного математического моделирования коммутационных процессов, связанных с коммутациями силовых полупроводниковых ключей, линейных выключателей и разнообразными

короткими замыканиями, их воспроизведение целесообразно осуществлять на модельном физическом уровне с помощью цифруправляемых аналоговых ключей (ЦУАК) согласно соответствующим цифруправляемым физическим моделям статического преобразователя напряжения (ЦУ ФМ СПН) и продольно-поперечного коммутатора (ЦУ ФМ ППК).

Реализация посредством микропроцессорного узла (МПУ) всех необходимых информационно-управляющих функций СГП ВПТ, связанных с аналого-цифровым преобразованием представленных напряжениями непрерывных математических переменных, моделированием системы автоматического управления (САУ), автоматизированным и автоматическим управлением, в том числе функциональным, параметрами и настройками моделируемого оборудования ВПТ, управлением коммутационными состояниями ЦУАК ЦУ ФМ ППК и ЦУ ФМ СПН, функциональным преобразованием и отображением информации, а также обеспечением коммуникационных взаимодействий с Сервером Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) осуществляется с помощью образующими МПУ центрального и периферийных процессоров.

3.1 Гибридный сопроцессор цепи постоянного тока специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока

Схема замещения одного из идентичных полюсов рассмотренной ранее структурной схемы ЦПТ приведена на рисунке 3.1.

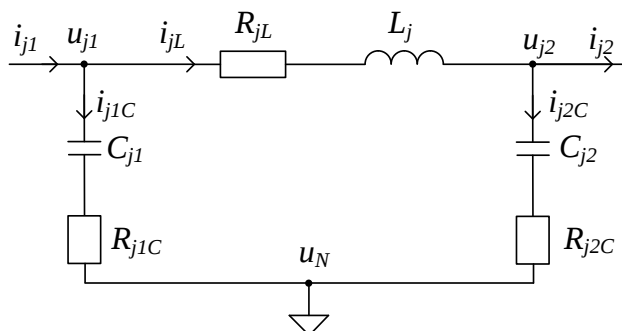


Рисунок 3.1 – Схема замещения полюса ЦПТ, где j – отрицательный или положительный полюс; R_{jL} и L_j – активное сопротивление и индуктивность сглаживающего реактора j -го полюса; R_{j1C} , R_{j2C} и C_{j1} , C_{j2} – активные сопротивления и емкости конденсаторных батарей j -го полюса; u_N – напряжение нейтрали

Соответствующая этой схеме замещения всережимная математическая модель каждого полюса ЦПТ образует систему уравнений:

$$\begin{cases} i_{j1C} = \frac{1}{R_{j1C}} \cdot (u_{j1} - u_{j1C} - u_N); & \frac{du_{j1C}}{dt} = \frac{1}{C_{j1}} \cdot i_{j1C}; \\ \frac{di_{jL}}{dt} = \frac{1}{L_j} (u_{j1} - u_{j2} - R_{jL} \cdot i_{jL}); \\ i_{j1} = i_{jL} + i_{j1C}; & i_{j2} = i_{jL} - i_{j2C}; \\ i_{j2C} = \frac{1}{R_{j2C}} \cdot (u_{j2} - u_{j2C} - u_N); & \frac{du_{j2C}}{dt} = \frac{1}{C_{j2}} \cdot i_{j2C}; \end{cases}, \quad (3.1)$$

где u_{j1C} , u_{j2C} – напряжения на реактивных сопротивлениях конденсаторных батарей j -го полюса ЦПТ.

Структурная схема специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры непрерывного и методически точного с гарантированной приемлемой

инструментальной погрешностью решения в реальном времени на неограниченном интервале данной системы уравнений с цифровым управлением параметрами математической модели, осуществляемым с помощью ЦАП, и преобразованием представленных мгновенными значениями напряжений непрерывных математических переменных входных-выходных токов с помощью преобразователей напряжение-ток (u/i) в соответствующие им модельные физические токи, образующая в совокупности с идентичной структурой другого полюса ГСП ЦПТ, приведена на рисунке 3.2:

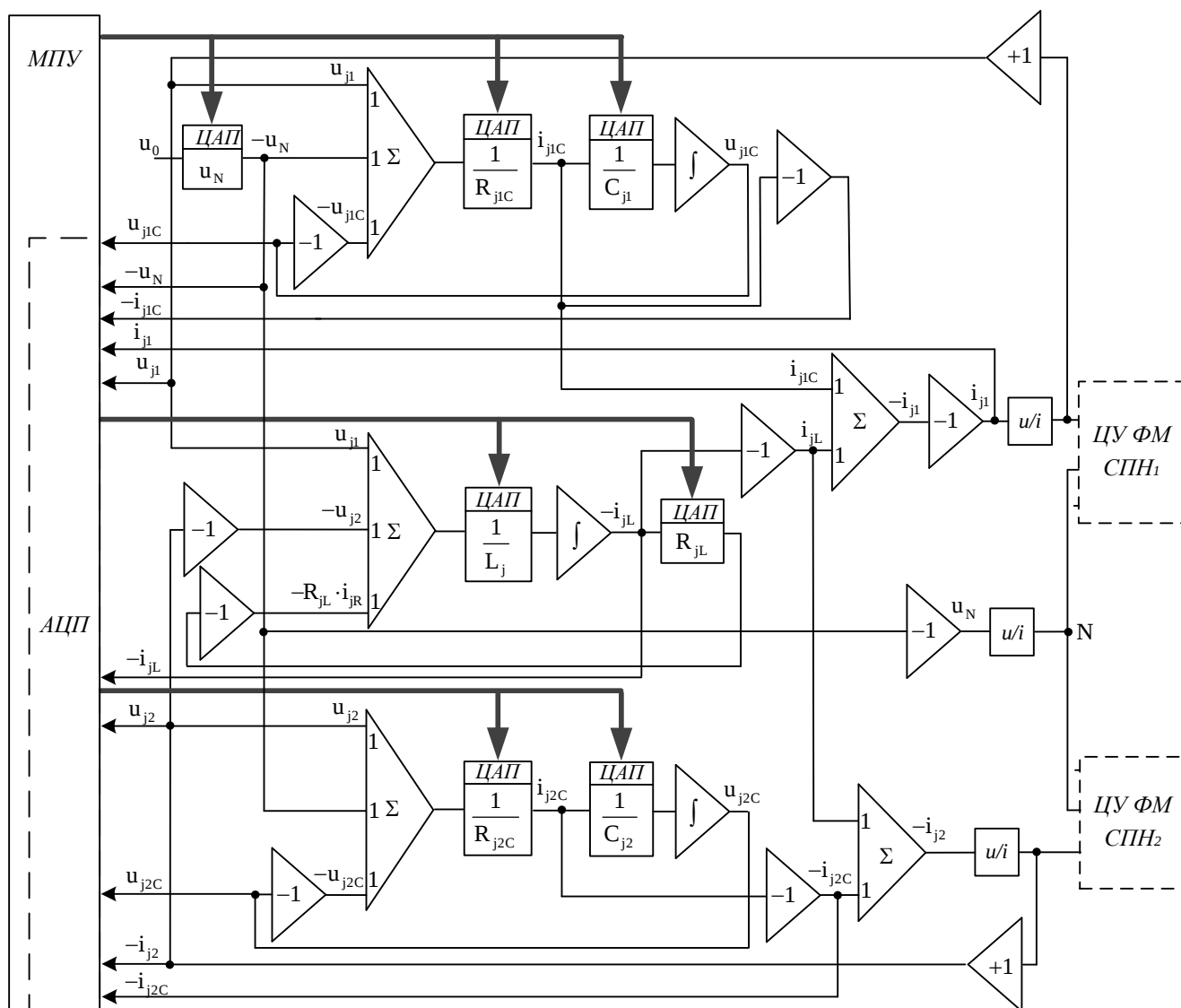


Рисунок 3.2 – Структурная схема j -го полюса ГСП ЦПТ, где u_0 – опорное напряжение для управляемого формирования напряжения нейтрали (u_N)

3.2 Гибридный сопроцессор трансформатора связи специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока

Всережимная математическая модель каждой $j = A, B, C$ фазы Т, воспроизводимая аналогичным предыдущему образом в ГСП Т с учетом возможных схем соединения обмоток, имеет идентичный для всех фаз вид:

$$\begin{cases} \frac{di_{j1}}{dt} = \frac{1}{L_{j1}} \cdot \left(u_{j1} - W_{j1} \cdot \frac{d\Phi_j}{dt} - R_{j1} \cdot i_{j1} \right) \\ \frac{di_{j2}}{dt} = \frac{1}{L_{j2}} \cdot \left(W_{j2} \cdot \frac{d\Phi_j}{dt} - u_{j2} - R_{j2} \cdot i_{j2} \right), \\ W_{j1} \cdot i_{\mu j} = W_{j1} \cdot i_{j1} - W_{j2} \cdot i_{j2} \\ \Phi_j \equiv f(i_{\mu j}) \end{cases} \quad (3.2)$$

где u_{j1} – напряжение j -ой фазы первичной обмотки Т; u_{j2} – напряжение j -фазы вторичной обмотки Т, которое при схеме соединения обмоток в звезду равно фазному, а в треугольник – линейному; i_{j1} и i_{j2} – токи первичной и вторичной обмоток j -ой фазы Т; W_{j1} и W_{j2} – число витков первичной и вторичной обмоток j -ой фазы Т; Φ_j – основной магнитный поток j -ой фазы Т; $i_{\mu j}$ – ток намагничивания j -ой фазы Т; R_{j1} и L_{j1} , R_{j2} и L_{j2} – активные сопротивления и индуктивности рассеивания первичной и вторичной обмоток j -ой фазы Т.

В подготовленном для решения, посредством использования уравнения в полных производных и соответствующей замены $\frac{dz_{j1}}{dt} = (u_{j1} - R_{j1} \cdot i_{j1})$,

$\frac{dz_{j2}}{dt} = (-R_{j2} \cdot i_{j2} - u_{j2})$ данная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dz_{j1}}{dt} = (u_{j1} - R_{j1} \cdot i_{j1}); & i_{j1} = \frac{1}{L_{j1}} \cdot (-W_{j1} \cdot \Phi_j + z_{j1}) \\ \frac{dz_{j2}}{dt} = (-R_{j2} \cdot i_{j2} - u_{j2}); & i_{j2} = \frac{1}{L_{j2}} \cdot (W_{j2} \cdot \Phi_j + z_{j2}), \\ i_{\mu j} = i_{j1} - \frac{1}{k} \cdot i_{j2}; & \Phi_j \equiv f(i_{\mu j}) \end{cases} \quad (3.3)$$

где $k = \frac{W_{j1}}{W_{j2}}$ – коэффициент трансформации.

Для адекватного непрерывного воспроизведения кривой намагничивания используется эффективная для данной цели гиперболическая аппроксимация с пропорциональной $i_{\mu j}$ аддитивной составляющей $K_4 \cdot i_{\mu j}$ [82]:

$$\Phi_j = \frac{K_1 \cdot i_{\mu j}}{K_2 + K_3 \cdot i_{\mu j}} + K_4 \cdot i_{\mu j}, \quad (3.4),$$

где K_1 , K_2 , K_3 и K_4 определяют конкретную аппроксимируемую кривую намагничивания, а также наклон кривой намагничивания до и на участке насыщения магнитопровода.

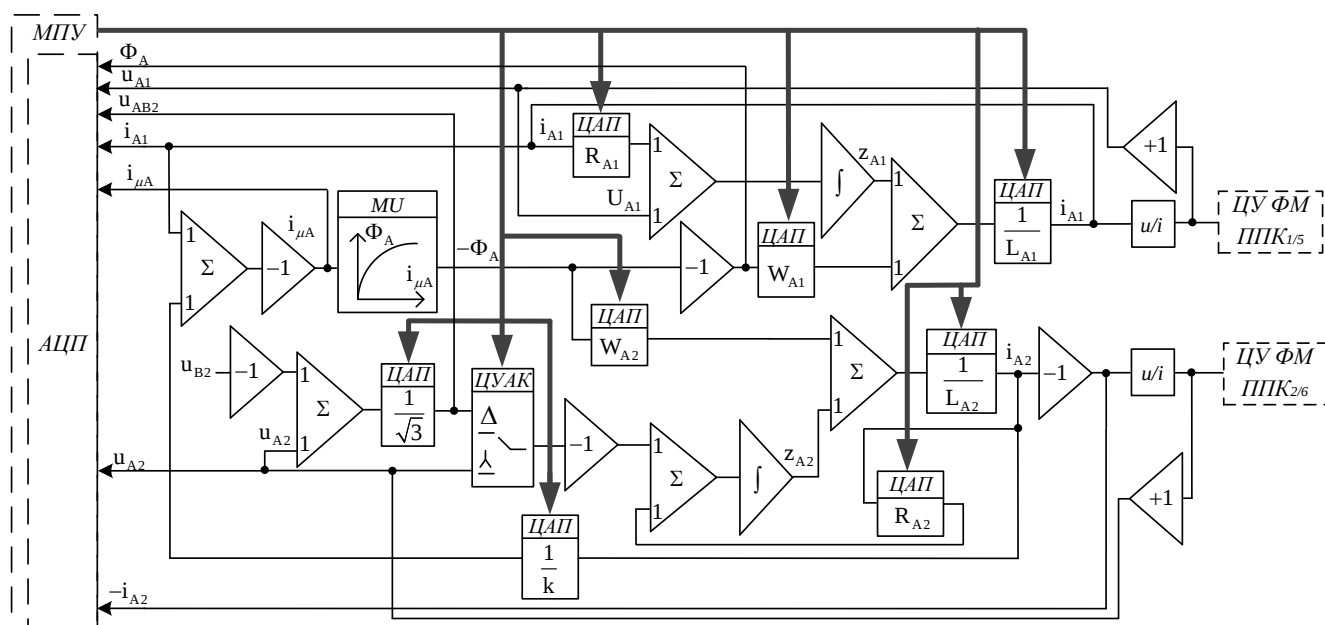


Рисунок 3.3 – Структурная схема фазы А ГСП трансформатора связи (Т), где ЦУАК – цифроуправляемый аналоговый ключ, используемый для выбора схемы соединения вторичной обмотки Т; МУ – функциональный преобразователь на базе интегрального перемножителя аналоговых сигналов, предназначенный для непрерывного воспроизведения кривой намагничивания согласно (3.4)

3.3 Гибридный сопроцессор фильтра высших гармоник специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока

Идентичная для каждой $j = A, B, C$ фазы схема замещения ФВГ приведена на рисунке 3.4.

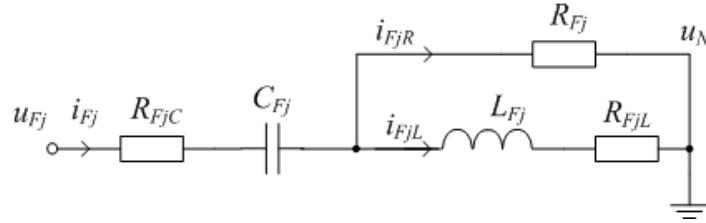


Рисунок 3.4 – Схема замещения j -ой фазы ФВГ, где R_{jC} и C_j – активное сопротивление и емкость конденсаторной батареи j -ой фазы; R_{jL} и L_j – активное сопротивление и индуктивность катушки j -ой фазы; R_j – сопротивление резистора j -ой фазы

Соответствующая данной схеме замещения воспроизводимая в ГСП ФВГ всережимная математическая модель каждой фазы ФВГ образует систему уравнений:

$$\begin{cases} i_{jR} = \frac{1}{R_j} \cdot (u_j - i_j \cdot R_{jC} - u_{jC} - u_N) \\ \frac{di_{jL}}{dt} = \frac{1}{L_j} \cdot (i_{jR} \cdot R_j - i_{jL} \cdot R_{jL}) \\ i_j = i_{jL} + i_{jR} \\ \frac{du_{jC}}{dt} = \frac{1}{C_j} \cdot i_j \end{cases}, \quad (3.5)$$

где u_{jC} – напряжение на реактивном сопротивлении конденсаторной батареи j -ой фазы ФВГ.

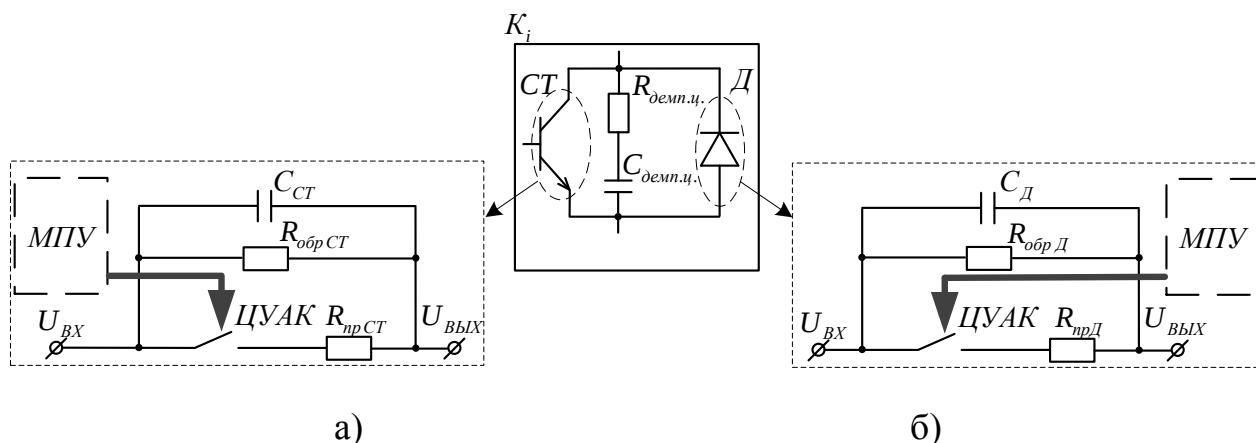


Рисунок 3.8 – Цифроуправляемая физическая модель быстродействующего полностью управляемого полупроводникового i -го ключа (K_i), содержащая модели силового транзистора (СТ) (а) и обратного диода (Д) (б), а также демпфирующую цепь ($R_{\text{демп.ц.}}$, $C_{\text{демп.ц.}}$)

Синтезированная с учетом вышеизложенного структурная схема ЦУ ФМ СПН моделируемой ВПТ представлена на рисунке 3.9.

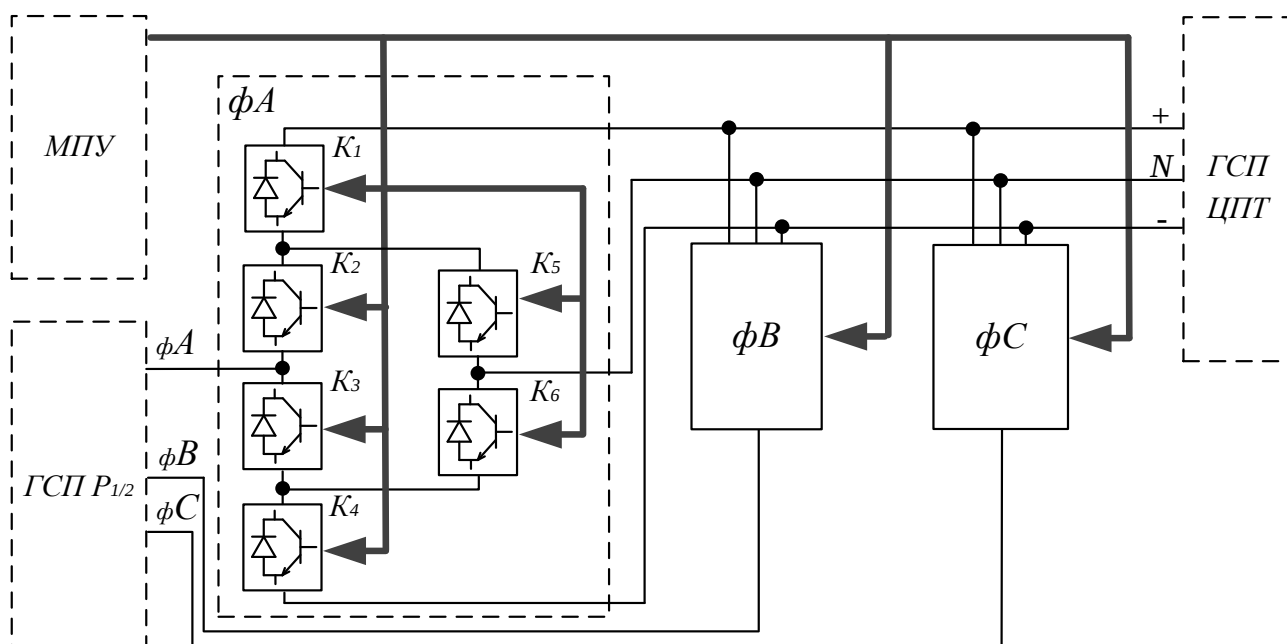


Рисунок 3.9 – Структурная схема цифроуправляемой физической модели 3-х уровневой статического преобразователя напряжения (ЦУ ФМ СПН)

Структурная схема ЦУ ФМ ППК, обеспечивающая адекватное воспроизведение коммутационных процессов всевозможных продольных и

поперечных трехфазных коммутаций, включая пофазные, в том числе с учетом сопротивлений шунтов выключателей ($R_{ш1-3}$) и переходных сопротивлений короткого замыкания ($R_{п1-3}$), представлена на рисунке 3.10.

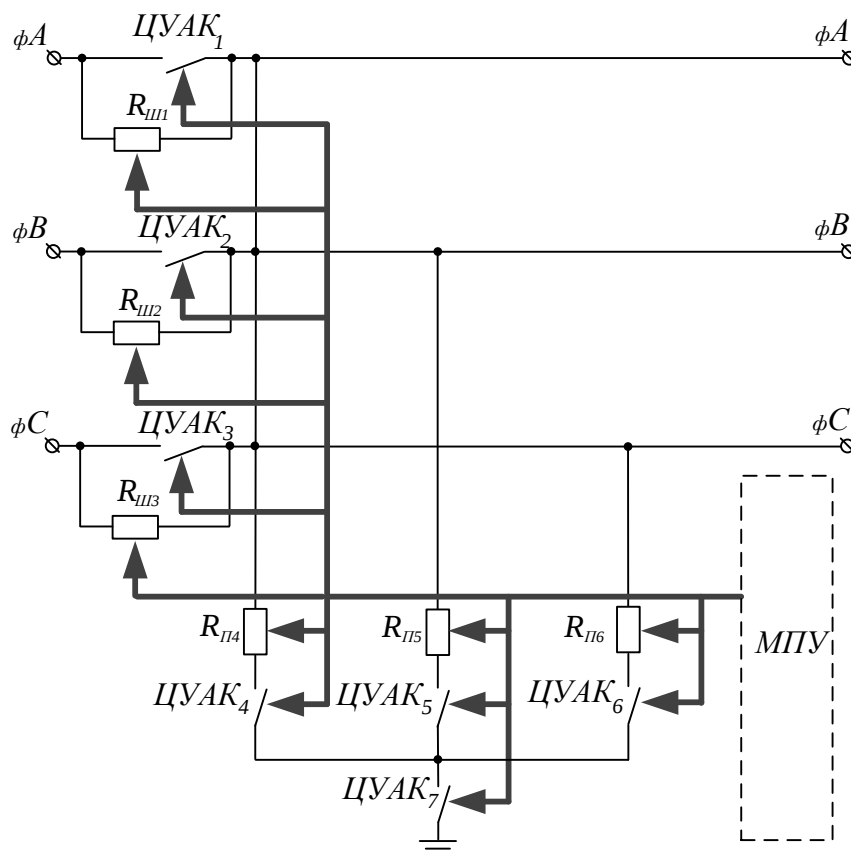


Рисунок 3.10 – Структурная схема ЦУ ФМ ППК

3.6 Микропроцессорный узел специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока

Согласно положению концепции всережимного моделирования функционирования ВПТ в ЭЭС все информационно-управляющие функции СГП ВПТ: коммуникации с Сервером ВМК РВ ЭЭС, прием и обработка данных моделирования, реализация САУ ВПТ, управление параметрами моделируемого оборудования, в том числе состоянием ЦУАК ЦУ ФМ СПН и ЦУ ФМ ППК, и др. осуществляются с помощью МПУ СГП ВПТ. Анализ всех этих функций и аспектов их реализаций (обеспечение выполнения в реальном времени

алгоритмов САУ, управления состоянием ЦУАК и др.) определяет приведенную на рисунке 3.11 структуру МПУ СГП ВПТ, в которой:

1) центральный процессор (ЦП) предназначен для обеспечения взаимодействия между Сервером ВМК РВ ЭЭС и процессорами аналого-цифрового преобразования ГСП (ПАЦП ГСП) и САУ (ПАЦП САУ), процессорами коммутации ЦУ ФМ ППК (ПК ЦУ ФМ ППК) и ЦУ ФМ СПН (ПК ЦУ ФМ СПН), в том числе приема от Сервера ВМК РВ ЭЭС значений параметров базы данных моделируемого оборудования ВПТ и их установка в ЦАП ГСП, передачу данных моделирования на Сервер ВМК РВ ЭЭС, синхронизации работы всех процессоров МПУ СГП ВПТ в ВМК РВ ЭЭС, перепрограммирование процессоров МПУ СГП ВПТ;

2) посредством ПАЦП ГСП обеспечивается аналого-цифровое преобразование, чтение и обработка данных моделирования ГСП, а также функциональное управление, включая динамическое, задаваемыми в ЦАП ГСП параметрами моделируемого оборудования;

3) ПАЦП САУ предназначен для оцифровки и функциональной обработки данных моделирования, необходимых для реализации алгоритмов САУ ВПТ (преобразование координат, формирование управляющих воздействий для широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и др.);

4) в ПК ЦУ ФМ СПН реализуются ШИМ и формирование управляющих воздействий для ЦУАК ЦУ ФМ СПН, а также быстродействующие защиты ВПТ;

5) с помощью ПК ЦУ ФМ ППК осуществляется управление ЦУАК ЦУ ФМ ППК, включая выполнение коммутаций в заданные моменты времени.

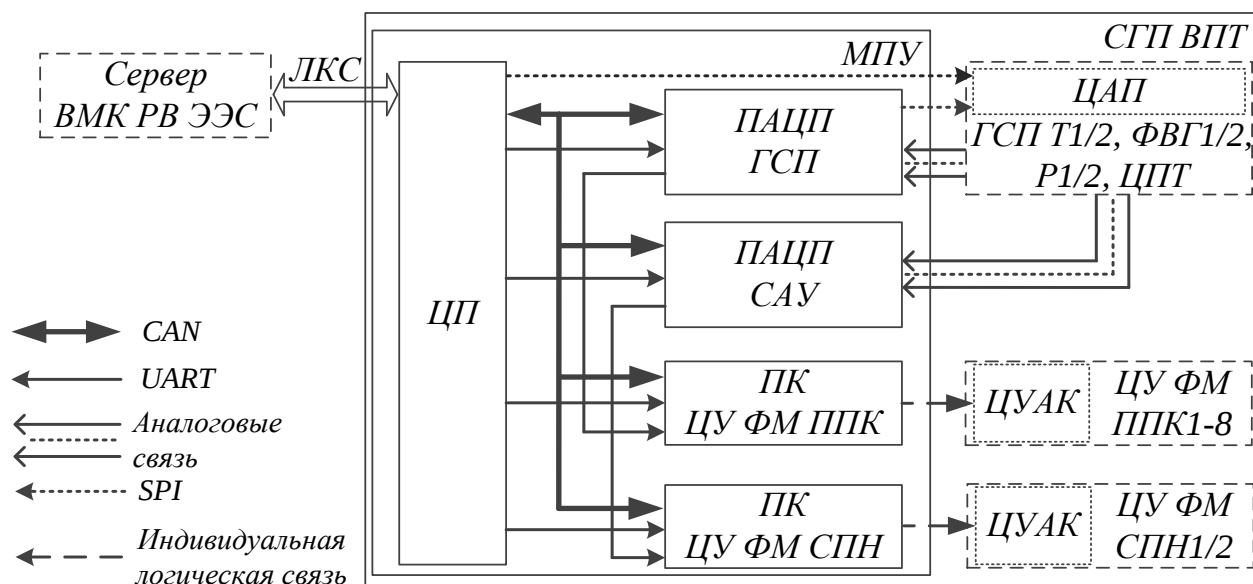


Рисунок 3.11 – Структурная схема микропроцессорного узла специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока (МПУ СГП ВПТ), где шина CAN (Controller Area Network), предназначена для широковещательных взаимодействий между процессорами МПУ; по шине UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) осуществляются индивидуальные взаимодействия между процессорами МПУ; шина SPI (Serial Peripheral Interface) используется для организации управления параметрами моделируемого оборудования, задаваемыми в ЦАП ГСП; посредством ЛКС (локальная компьютерная сеть) обеспечиваются информационно-управляющие взаимодействия ЦП с Сервером Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС)

Приведенная структура МПУ и распределение функций между процессорами позволяют выполнять в реальном времени алгоритмы САУ ВПТ, оперативное управление ЦУАК ЦУ ФМ ППК, автоматизированное и автоматическое управление, включая функциональное, параметрами и настройками моделируемого с помощью ГСП оборудования, преобразование форм представления информации и ее функциональную обработку, а также все необходимые коммуникационные взаимодействия с Сервером ВМК РВ ЭЭС.

3.7 Выводы

В соответствии с обоснованными в предыдущей главе концепцией всережимного моделирования функционирования ВПТ в ЭЭС и структурой средств её осуществления разработаны принципы построения:

1) ГСП Т, ГСП ФВГ, ГСП Р и ГСП ЦПТ, представляющих соответствующие решаемым системам уравнений этого оборудования параллельные цифро-аналоговые структуры методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале дифференциальных систем уравнений, с возможностью цифрового управления, в том числе функционального, параметрами этих математических моделей и преобразования представленных мгновенными значениями напряжений непрерывных математических переменных входных-выходных токов с помощью преобразователей напряжение-ток (u/i) в соответствующие им модельные физические токи, обеспечивающего их естественное взаимодействие согласно структуре ВПТ, а также ВПТ в ЭЭС;

2) ЦУ ФМ СПН, позволяющей адекватно воспроизводить топологию моделируемой схемы СПН ВПН посредством ЦУАК и коммутационные процессы силовых полупроводниковых ключей;

3) ЦУ ФМ ППК на базе ЦУАК, обеспечивающей адекватное воспроизведение процессов всевозможных продольных и поперечных трехфазных коммутаций, включая пофазные;

4) МПУ, в котором все необходимые информационно-управляющие функций СГП ВПТ, связанные с моделированием САУ, автоматизированным и автоматическим управлением, в том числе функциональным, параметрами и настройками моделируемого оборудования ВПТ, управлением коммутационными состояниями ЦУАК ЦУ ФМ ППК и ЦУ ФМ СПН, функциональным преобразованием и отображением информации, а также осуществлением всех необходимых коммуникационных взаимодействий с Сервером ВМК РВ ЭЭС,

распределены между центральным и функционально ориентированными периферийными процессорами, образующими данный МПУ СГП ВПТ.

В результате сформированы принципы построения всех элементов СГП ВПТ, обеспечивающие гарантированную реализацию всех положений предложенной концепции всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в ЭЭС.

ГЛАВА 4. ТЕСТОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ ВСЕРЕЖИМНОГО АДЕКВАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для подтверждения адекватности разработанных гибридных сопроцессоров (ГСП) трансформаторов связи (Т), фильтров высших гармоник (ФВГ), фазных реакторов (Р), цепи постоянного тока (ЦПТ), цифруправляемых физических моделей статического преобразователя напряжения (ЦУ ФМ СПН) и продольно-поперечного коммутатора (ЦУ ФМ ППК) специализированного гибридного процессора (СГП) вставки постоянного тока (ВПТ) выполнен комплекс их тестовых исследований.

Целью тестовых исследований микропроцессорного узла (МПУ) СГП, реализованного согласно соответствующему положению концепции с помощью интегральной микропроцессорной техники, является оценка соответствия времён формирования измеряемых режимных параметров и управляющих воздействий, а также выполнения алгоритмов системы автоматического управления (САУ) и определение запаса вычислительных ресурсов микроконтроллеров, обеспечивающего возможность усложнения реализованных и добавления новых контуров регулирования САУ ВПТ для различных конкретных целей.

Оценка характеристик разработанного МПУ проведена с учетом его структуры, интерфейсов взаимодействия и выполнения алгоритмов САУ ВПТ (управление состоянием ЦУАК ЦУ ФМ СПН), реализации всех информационно-управляющих функций (автоматизированное и автоматическое управление, в том числе функциональное, параметрами математически моделируемого оборудования, управления состоянием ЦУАК ЦУ ФМ ППК, взаимодействия с Сервером ВМК ВР ЭЭС, АРМ Клиента и внешними программно-техническими средствами).

4.1 Тестовые исследования гибридных сопроцессоров специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока

Цели тестовых исследований ГСП с учетом сложности их математических моделей, а также реализующих эти модели структурных схем и их функционально-элементного состава, позволяют выполнить свойства и возможности программы Multisim 11.0. Необходимые для этого конкретные данные параметров моделируемого оборудования и др. приведены в приложении Б.

Согласно принципам построения СГП ВПТ структура каждого ГСП включает цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), посредством которых осуществляется задание и динамическое управление параметрами математической модели. В рамках тестовых испытаний, ввиду отсутствия необходимости тестирования задания и управления параметрами математических моделей, эти параметры реализованы соответствующими коэффициентами передачи суммирующих и масштабирующих элементов этих структур, реализуемых на базе интегральных операционных усилителей.

4.1.1 Тестовые исследования гибридного сопроцессора цепи постоянного тока

На рисунке 4.1 представлена компьютерная модель специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры реализации математической модели одного из полюсов ЦПТ, соответствующая представленной ранее структурной схеме ГСП ЦПТ (рис.3.1).

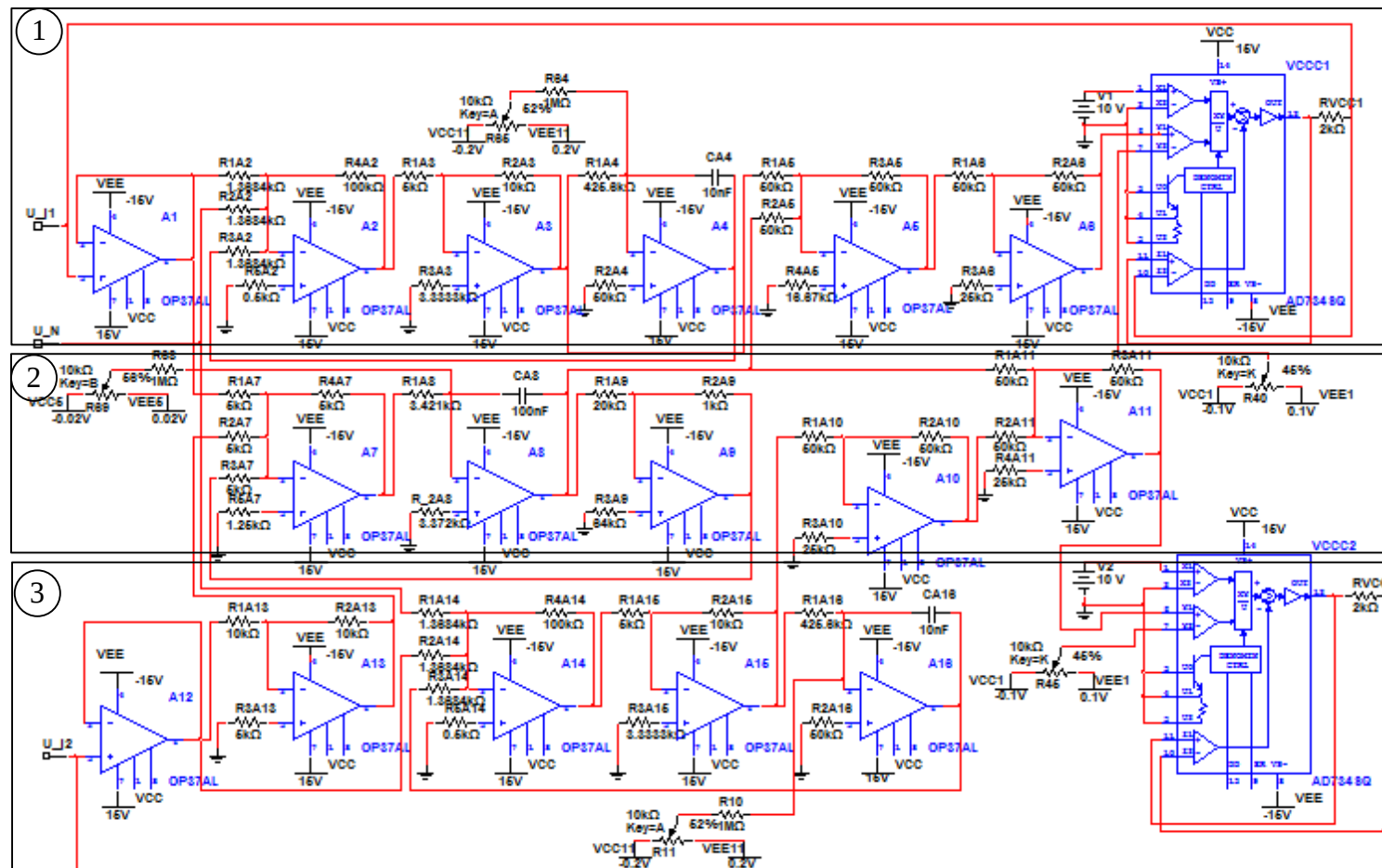


Рисунок 4.1 – Компьютерная модель специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры реализации математической модели одного из идентичных полюсов ГСП ЦПТ, в которых ЦАП заменены конкретными коэффициентами передач соответствующих элементов схемы, где 1 и 3 – реализация моделей конденсаторных батарей (КБ), а 2 – модели сглаживающего реактора (СР).

Приведённые на рисунках 4.2–4.7 осциллограммы напряжения и тока тестовых исследований подтверждают адекватность данных моделей и соответственно разработанного ГСП ЦПТ в целом.

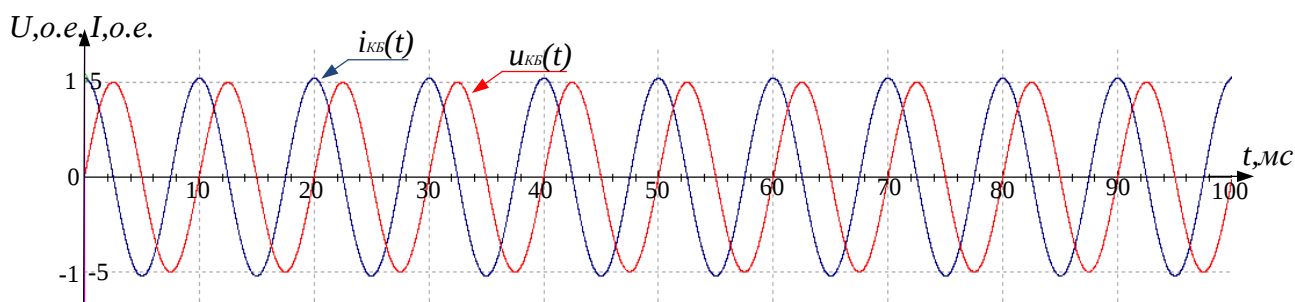


Рисунок 4.2 – Осциллограммы напряжения и тока, воспроизводимые компьютерной моделью КБ одного из полюсов ГСП ЦПТ

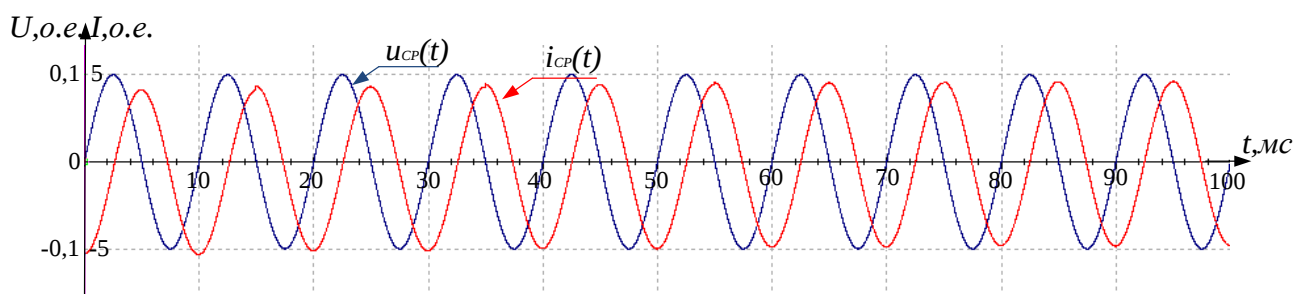
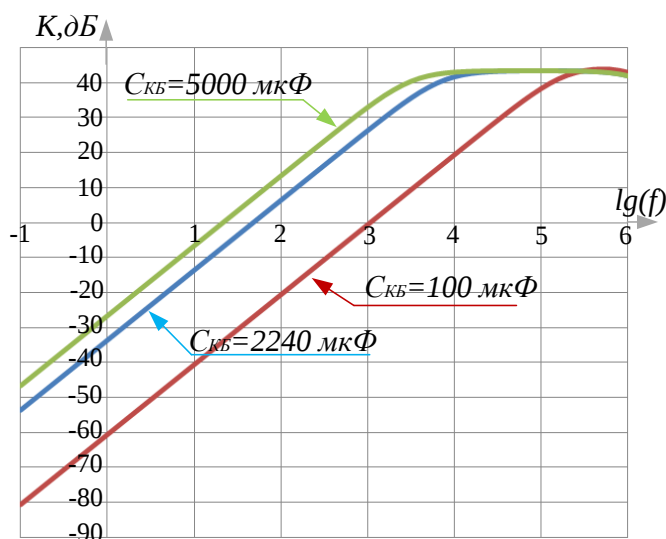
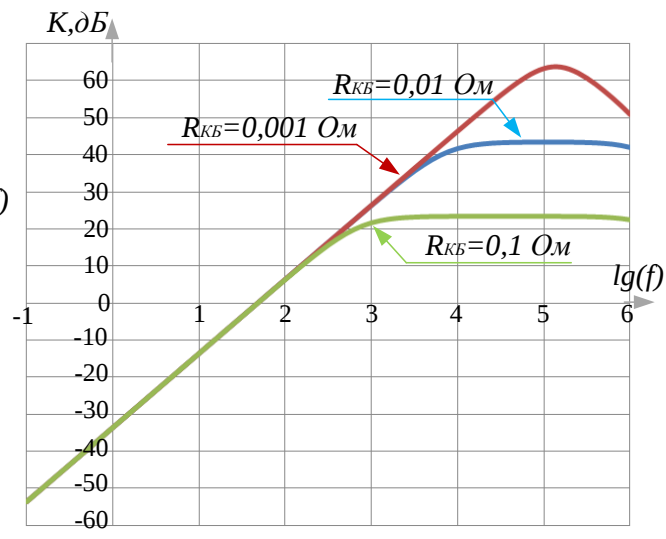


Рисунок 4.3 – Осциллограммы напряжения и тока, воспроизводимые компьютерной моделью СР одного из полюсов ГСП ЦПТ

Частотные свойства моделей КБ и СР ЦПТ иллюстрируют логарифмические амплитудно-частотные (ЛАЧХ) и фазо-частотные характеристики (ЛФЧХ), полученные при различных возможных параметрах этих моделей (рис. 4.4–4.7).

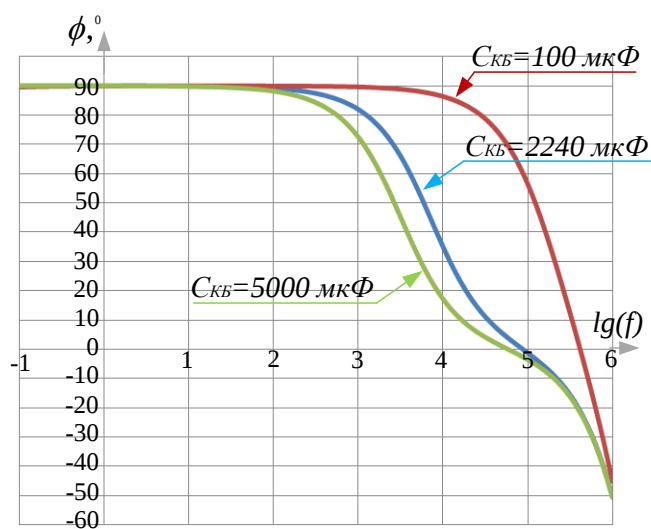


а)

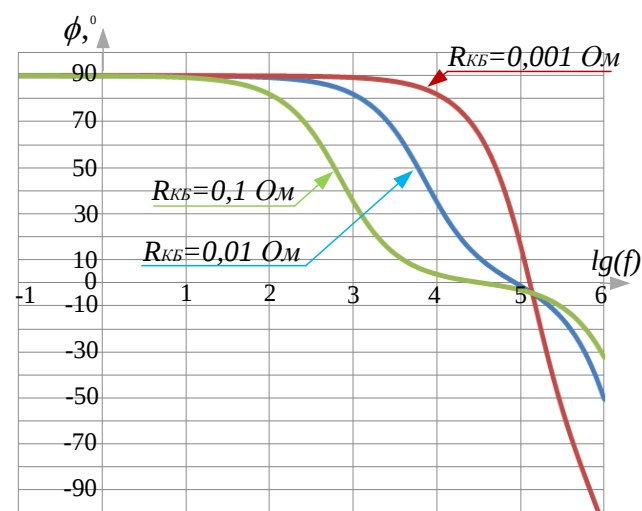


б)

Рисунок 4.4 – ЛАЧХ компьютерной модели КБ при возможных значениях емкости и активного сопротивления, определяемых техническими параметрами КБ



а)



б)

Рисунок 4.5 – ЛФЧХ компьютерной модели КБ при возможных значениях емкости и активного сопротивления, определяемых техническими параметрами КБ

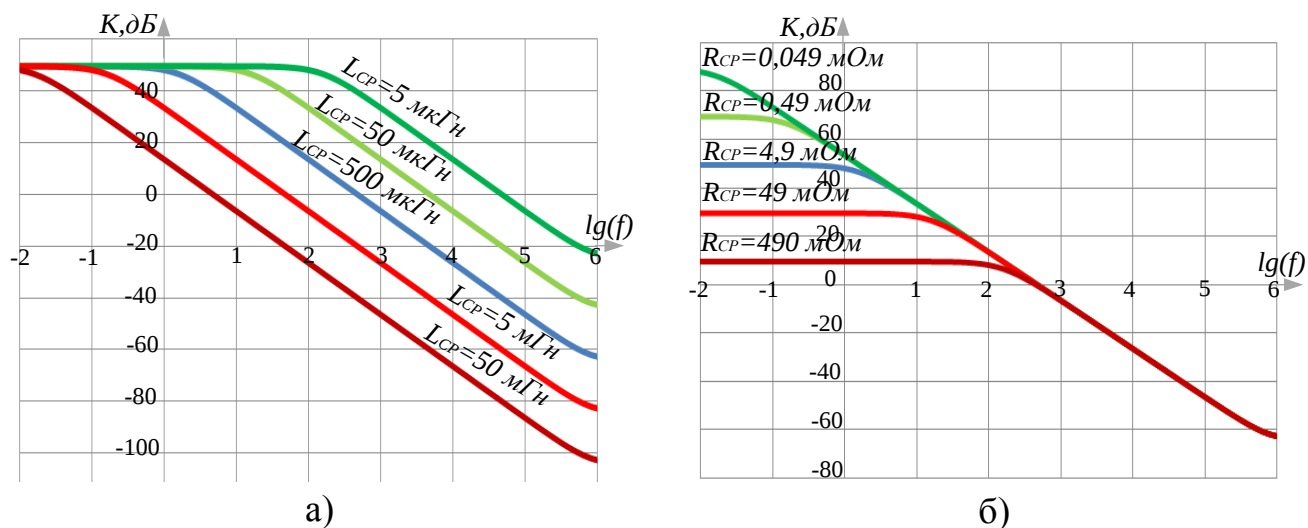


Рисунок 4.6 – ЛАЧХ компьютерной модели СР при возможных значениях емкости и активного сопротивления, определяемых техническими параметрами СР

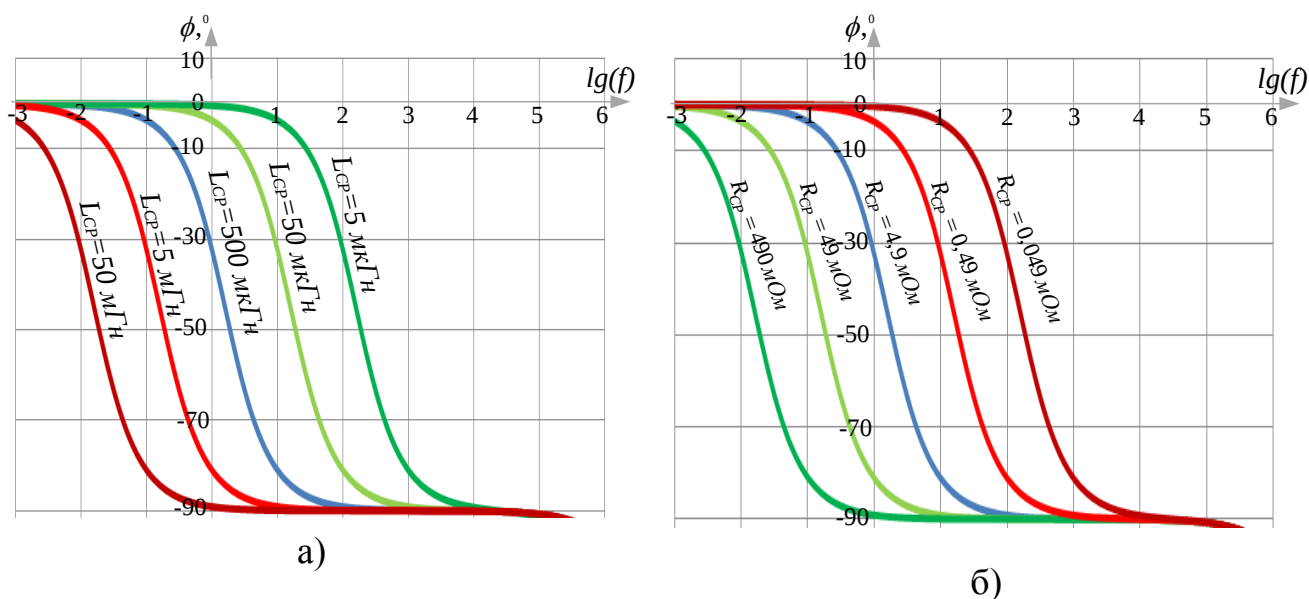


Рисунок 4.7 – ЛФЧХ компьютерной модели СР при возможных значениях емкости и активного сопротивления, определяемых техническими параметрами СР

Адекватность частотных характеристик разработанных моделей КБ и СР ЦПТ подтверждена результатами их сравнения с теоретическими частотными характеристиками:

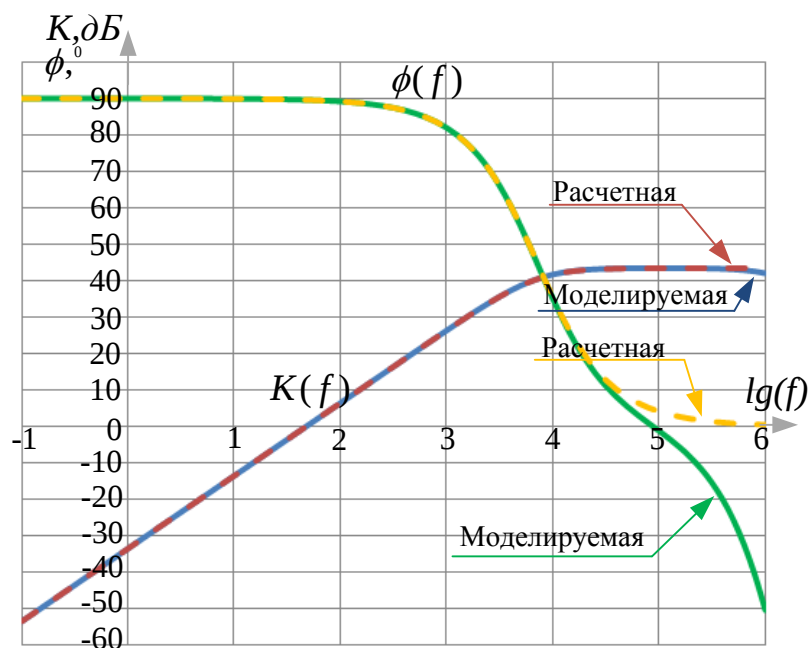


Рисунок 4.8 – ЛАЧХ и ЛФЧХ модели КБ ЦПТ при $C_{KB} = 2240 \text{ мкФ}$ и $R_{KB} = 0,01 \text{ Ом}$

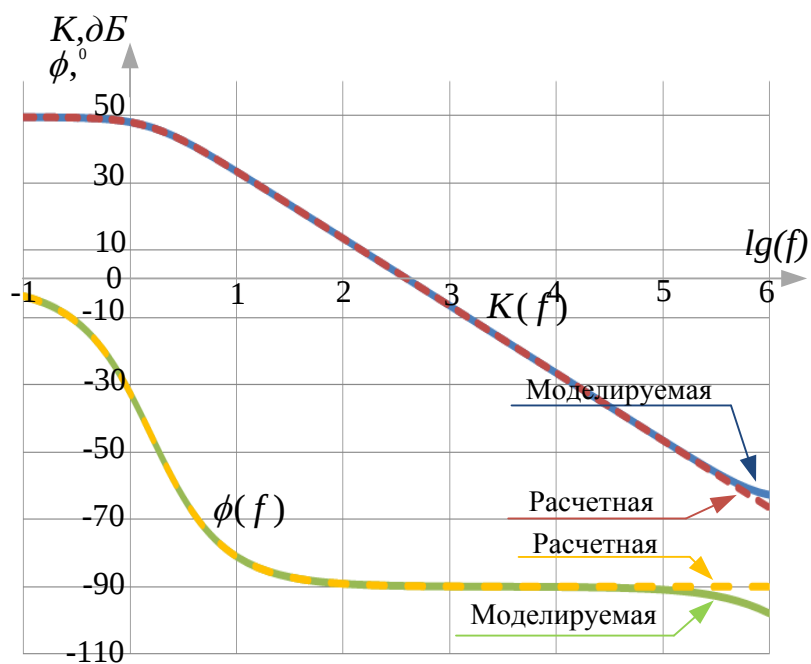


Рисунок 4.9 – ЛАЧХ и ЛФЧХ модели СР ЦПТ при $L_{CP} = 500 \text{ мкГн}$ и $R_{CP} = 4,9 \text{ мОм}$

4.1.2 Тестовые исследования гибридного сопроцессора трансформатора связи

Компьютерная модель специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры реализации математической модели j -ой фазы ГСП Т, соответствующая представленной ранее структурной схеме Т (рис. 3.3), изображена на рисунке 4.10

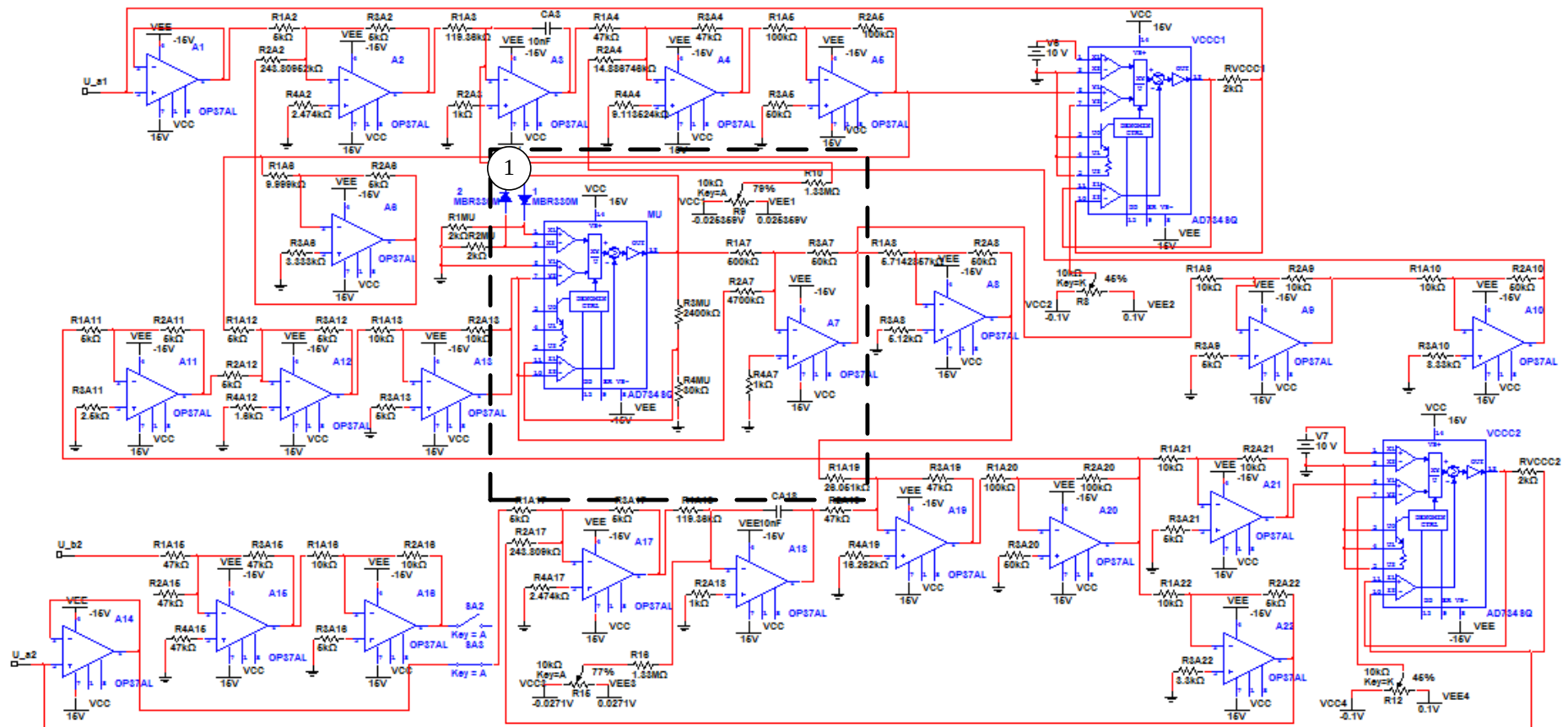


Рисунок 4.10 – Компьютерная модель специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры реализации математической модели j -ой фазы ГСП Т, в которых ЦАП заменены конкретными коэффициентами передач соответствующих элементов схемы, где 1 – функциональный преобразователь, реализующий гиперболическую аппроксимацию, а соотношения R_7 и R_5 , R_3 и R_4 , R_1 и R_2 , R_7 и R_6 определяют соответственно коэффициенты K_1 , K_2 , K_3 , K_4 уравнения 3.4

Для подтверждения адекватности воспроизведения кривой намагничивания результаты её моделирования сравнивались с расчетной кривой, полученной путем гиперболической аппроксимации на основе справочных данных (табл.1).

Таблица 1. Зависимость $B(H)$ холоднокатаной стали 3413

B, Тл	0	0,04	0,11	0,24	0,34	0,5	0,62	0,75	0,9	1,06
H, А/м	0	1,12	33	5,69	7,5	10	11,69	13,44	15,44	17,81
B, Тл	1,29	1,35	1,43	1,5	1,62	1,7	1,77	1,8	1,9	2,07
H, А/м	21,56	22,63	24,13	26,13	30,69	39,19	55,63	121,25	3937	11357

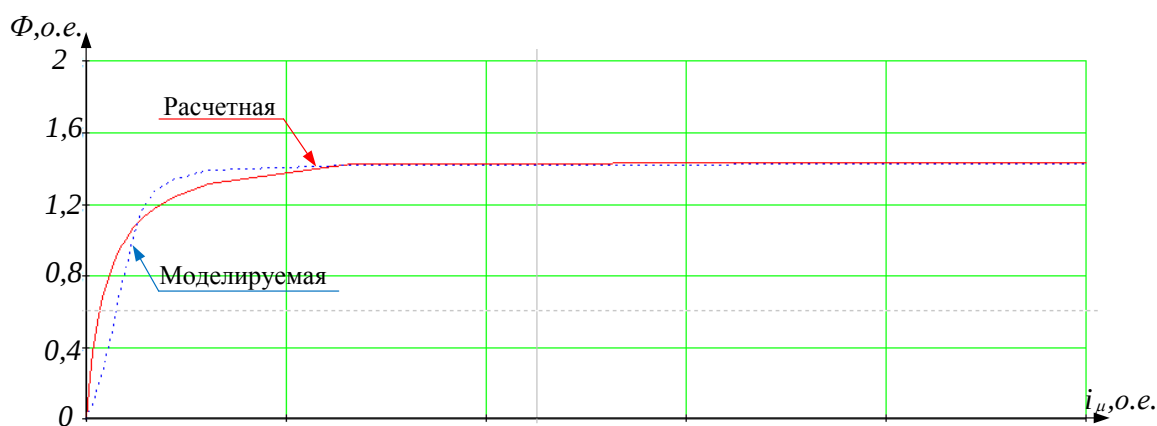


Рисунок 4.11 – Результаты тестовых исследований моделирования кривой намагничивания

Адекватность разработанной модели Т в целом иллюстрируют представленные на рисунках 4.12–4.14 осциллограммы тока и напряжения первичной обмотки, а также тока намагничивания и магнитного потока j -ой фазы Т.

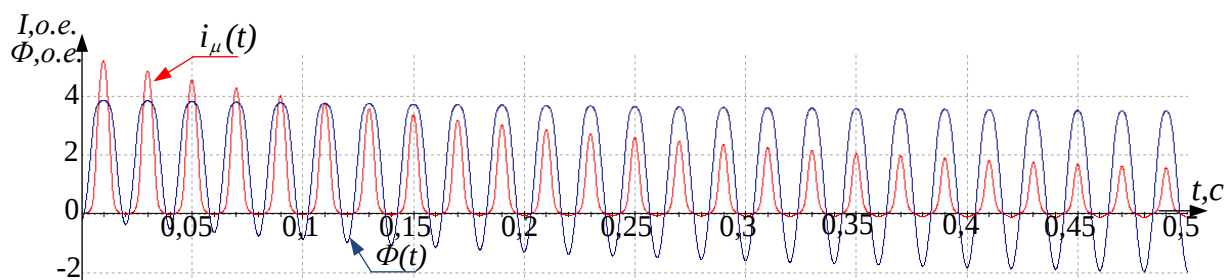


Рисунок 4.12 – Осциллограммы тока намагничивания и магнитного потока, воспроизводимые компьютерной моделью j -ой фазы ГСП Т при включении на XX

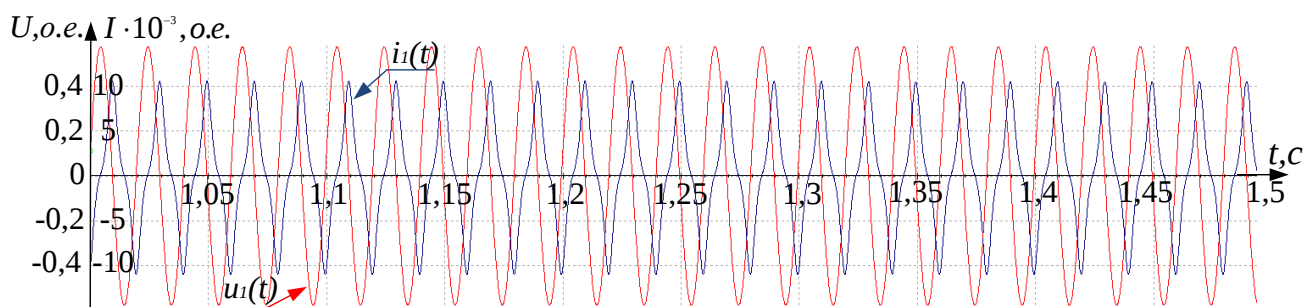


Рисунок 4.13 – Осциллограммы тока и напряжения первичной обмотки, воспроизводимые компьютерной моделью j-ой фазы ГСП Т при включении на ХХ

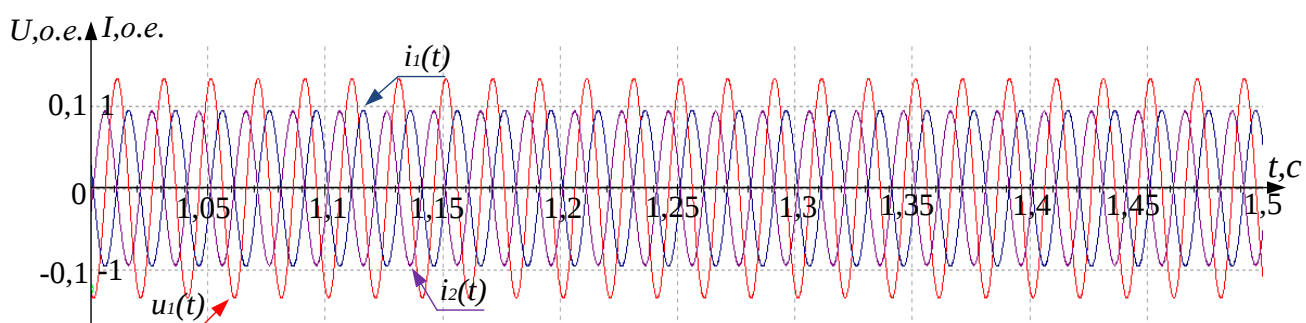


Рисунок 4.14 – Осциллограммы тока и напряжения первичной обмотки и тока вторичной обмотки, воспроизводимые компьютерной моделью j-ой фазы ГСП Т при КЗ

4.1.3 Тестовые исследования гибридного сопроцессора фильтра высших гармоник

Сформированная компьютерная модель специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры реализации математической модели j-ой фазы ФВГ, соответствующая представленной ранее структурной схеме ГСП ФВГ (рис.3.5), приведена на рисунке 4.15.

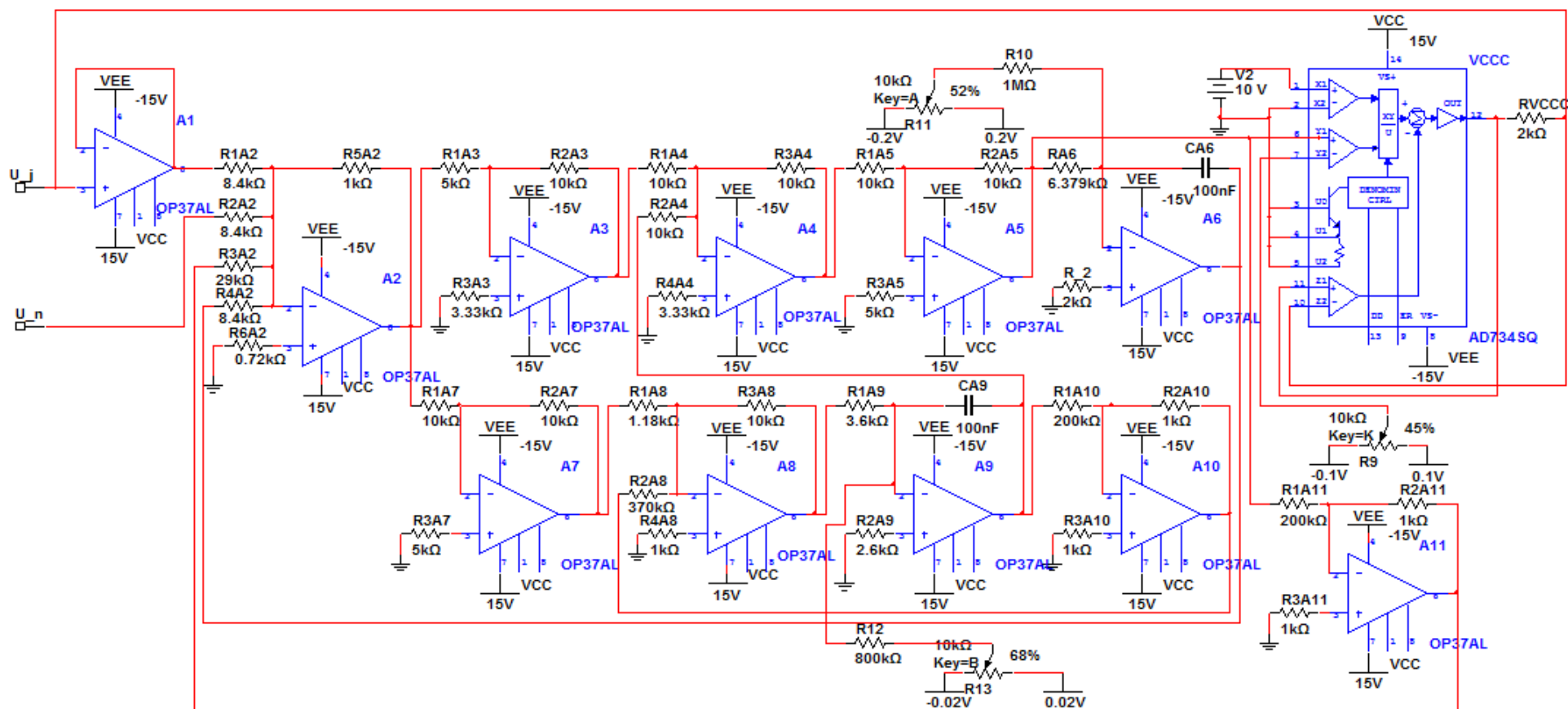


Рисунок 4.15 – Компьютерная модель специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры реализации математической модели j-ой фазы ГСП ФВГ, в которых ЦАП заменены конкретными коэффициентами передач соответствующих элементов схемы.

Результаты тестовых исследований, подтверждающих адекватность разработанного ГСП ФВГ, выполнены аналогично предыдущим путем компьютерного моделирования, приведены на рисунке 4.16.

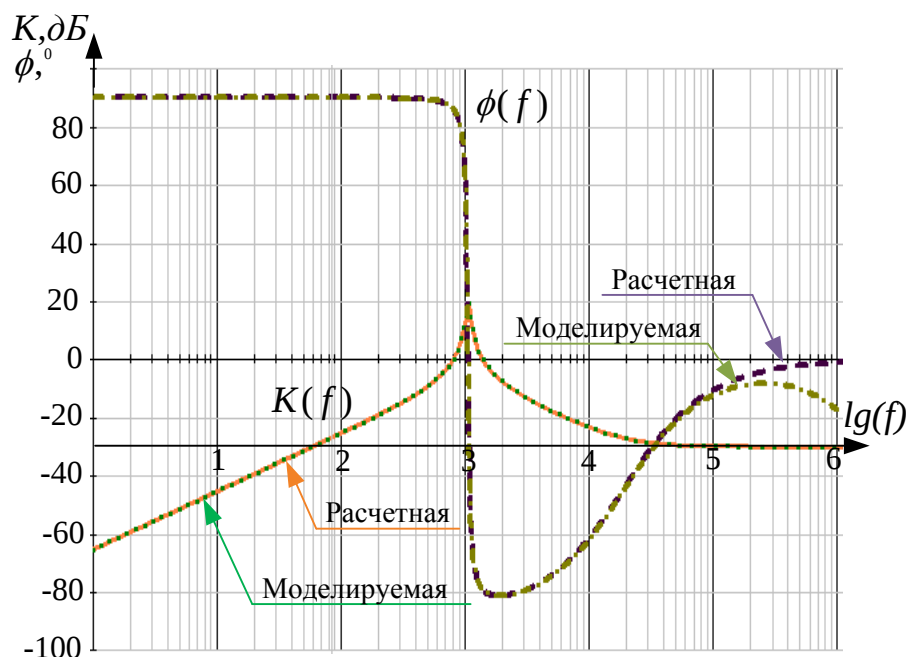


Рисунок 4.16 – ЛАЧХ и ЛФЧХ j-ой фазы ГСП ФВГ при $L_\phi = 400 \text{ мкГн}$,

$$R_{\phi_L} = 0,0015 \text{ Ом}, R = 46,8 \text{ Ом}, C_\phi = 17,5 \text{ мкФ} \text{ и } R_{\phi_C} = 0,016 \text{ Ом}$$

Полученные частотные характеристики иллюстрируют настройку фильтра на частоту коммутации широтно-импульсной модуляции (ШИМ) 1050 кГц, обеспечивающую максимальный коэффициент подавления и опрокидывание фазы ФВГ.

4.1.4 Тестовые исследования гибридного сопроцессора фазного реактора

Соответствующая представленной на рисунке 3.6 структурной схеме ГСП Р компьютерная модель данной специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры реализации математической модели j-ой фазы Р приведена на рисунке 4.17.

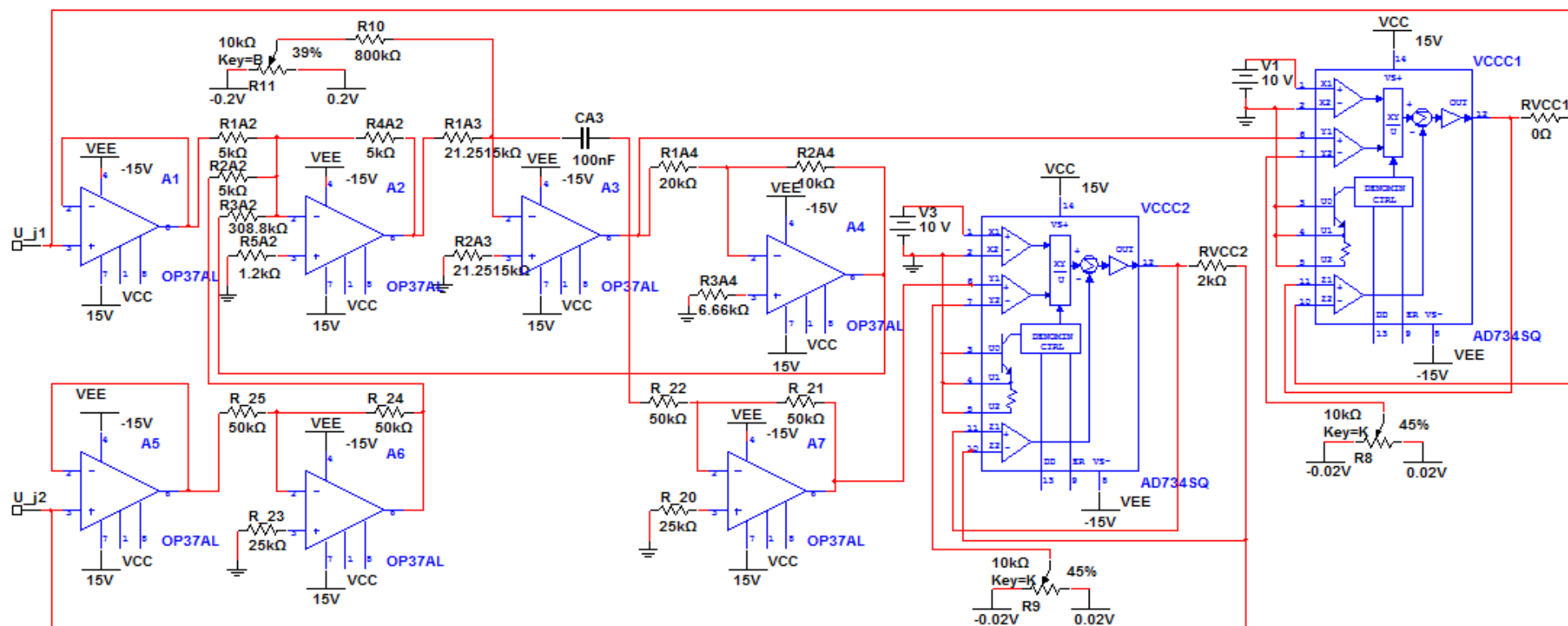


Рисунок 4.17 – Компьютерная модель специализированной параллельной цифро-аналоговой структуры реализации математической модели j -ой фазы ГСП Р, в которых ЦАП заменены конкретными коэффициентами передач соответствующих элементов схемы.

Полученные осциллограммы воспроизведения напряжения и тока j -ой фазы ГСП Р идентичны функционированию реального Р:

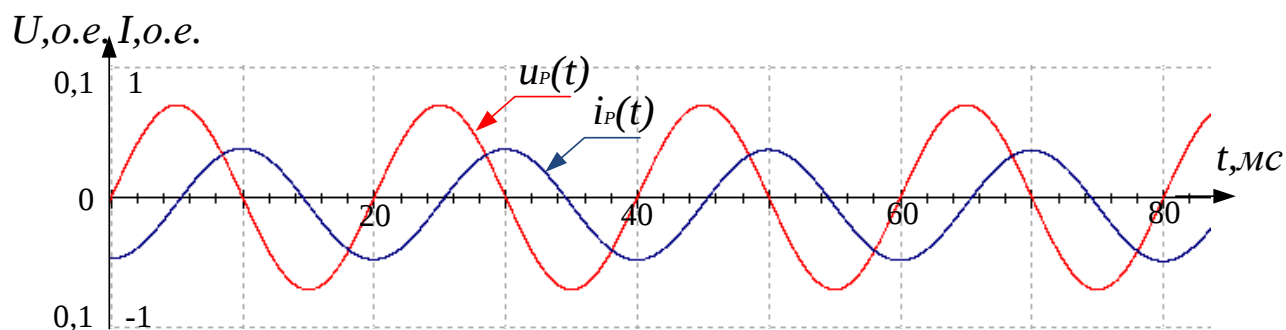


Рисунок 4.18 – Осциллограммы напряжения и тока, воспроизводимых компьютерной моделью j -ой фазы ГСП Р

Адекватность разработанного ГСП Р подтверждается также его ЛАЧХ и ЛФЧХ при различных возможных параметрах данного оборудования (рис.4.19–4.20).

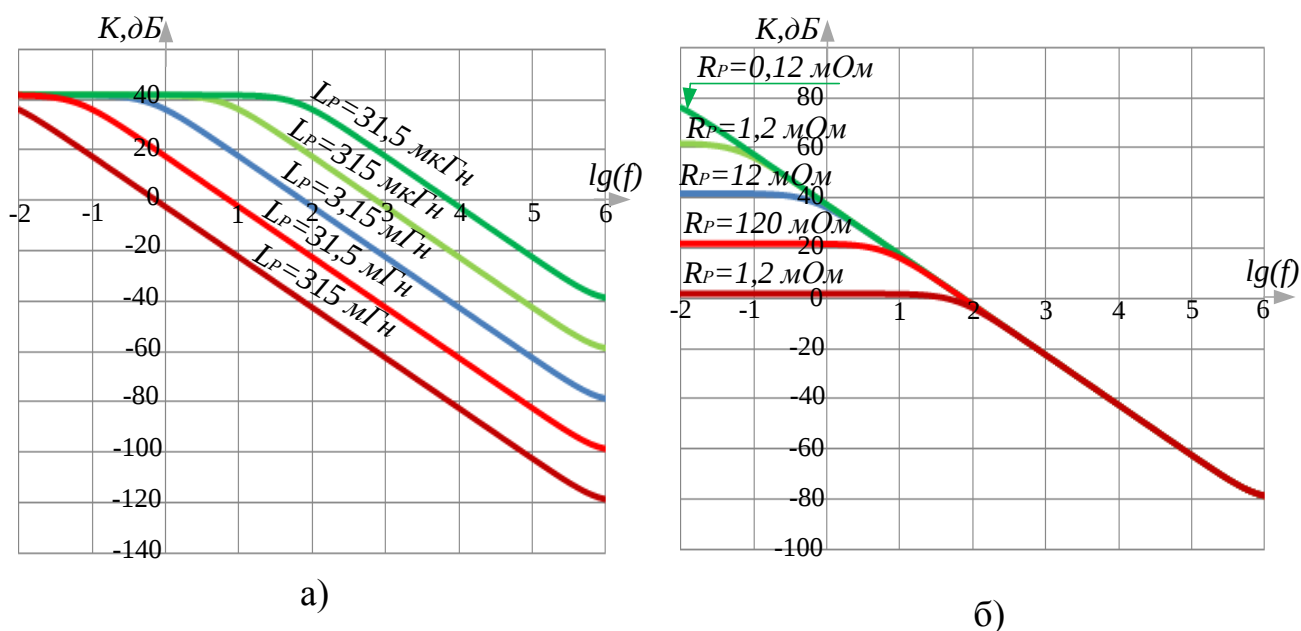


Рисунок 4.19 – ЛАЧХ компьютерной модели реактора при возможных значениях индуктивности и активного сопротивления, определяемых техническими параметрами Р

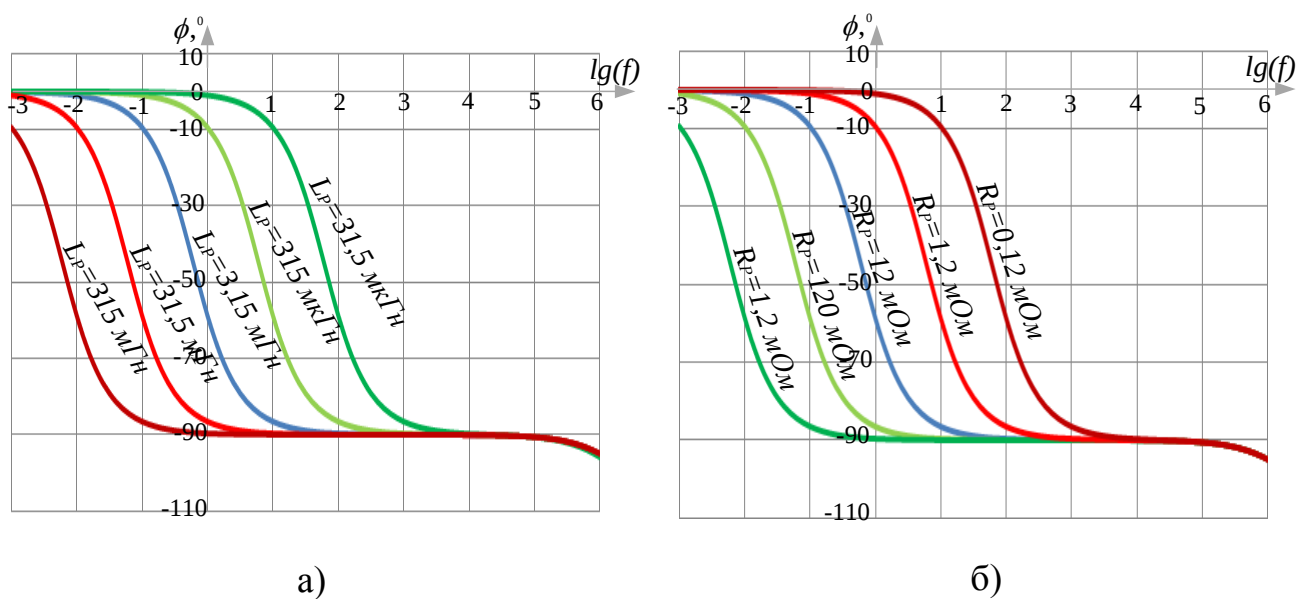


Рисунок 4.20 – ЛФЧХ компьютерной модели реактора при возможных значениях индуктивности и активного сопротивления, определяемых техническими параметрами Р

Соответствие частотных свойств ГСП Р иллюстрируют приведённые на рисунке 4.21 ЛАЧХ и ЛФЧХ j-ой фазы Р:

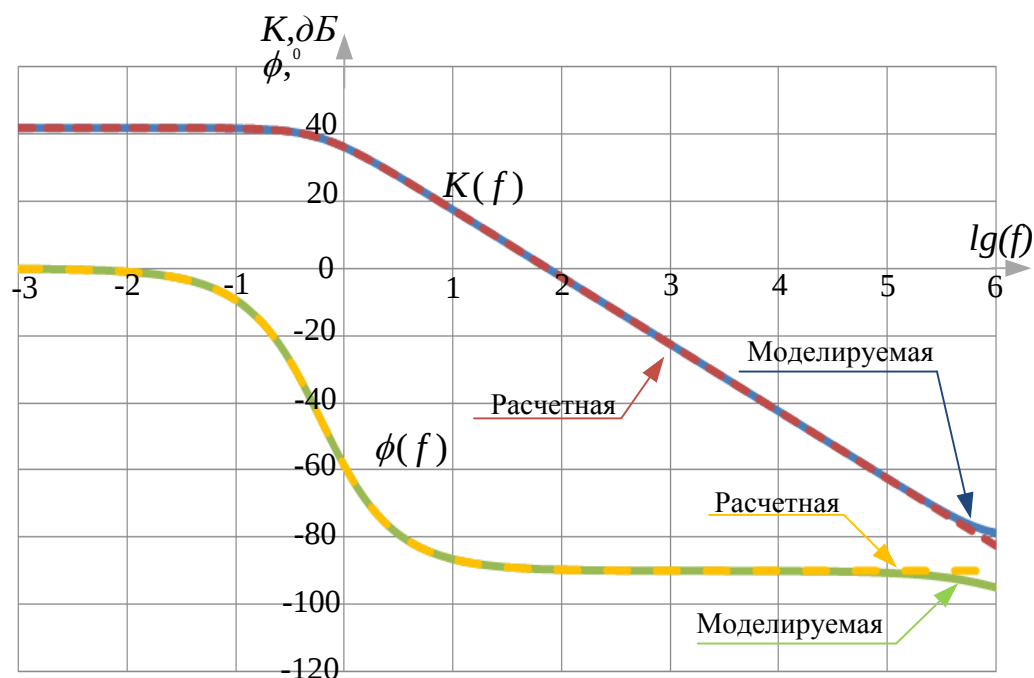


Рисунок 4.21 – ЛАЧХ и ЛФЧХ j-ой фазы ГСП Р при $L_p = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ и $R_p = 0,012 \text{ Ом}$.

4.2 Тестовые исследования цифруправляемых физических моделей специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока

В комплексе тестовых исследований разработанного СГП ВПТ одним из наиболее важных является исследование адекватности моделирования коммутационных процессов СПН, осциллограммы которых, подтверждающие данное обстоятельство, приведены на рисунках 4.22 и 4.23.

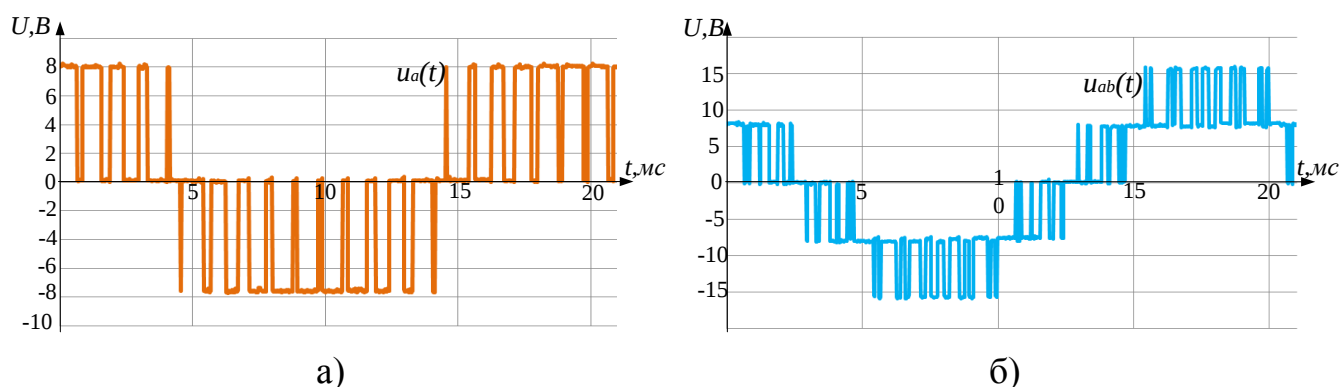


Рисунок 4.22 – Осциллограммы фазного (а) и линейного (б) напряжений на выходе ЦУ ФМ СПН на базе ЦУАК, функционирующего в режиме инвертора

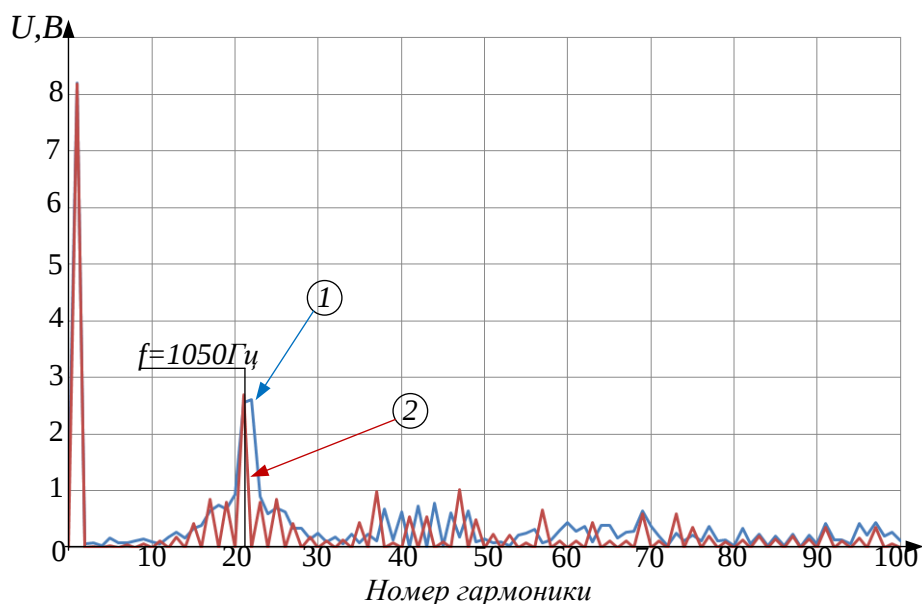


Рисунок 4.23 – Результаты спектрального анализа фазного напряжения на выходе ЦУ ФМ СПН на базе ЦУАК, функционирующего в режиме инвертора: 1 – физическое моделирование СПН на базе ЦУАК, 2 – компьютерное моделирование СПН в MatLAB Simulink.

Тестовые исследования ЦУ ФМ ППК принципиально не отличаются от испытаний ЦУ ФМ СПН, за исключением необходимости учета конкретных параметров моделируемых силовых ключей, и заключается в воспроизведении собственно процесса коммутации ЦУАК, который был ранее приведен на рисунке 3.7, подтверждающего возможность воспроизведения ими различных продольных и поперечных трехфазных коммутаций, включая пофазные.

4.3 Тестовые исследования микропроцессорного узла специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока

Согласно рассмотренным ранее концепции и принципам построения СГП ВПТ все необходимые информационно-управляющие функции, включая моделирование системы автоматического управления (САУ) ВПТ, распределены между центральным и функционально ориентированными периферийными процессорами, образующими микропроцессорный узел (МПУ) СГП ВПТ.

Современные САУ ВПТ реализуются во вращающейся dq системе координат и обеспечивают работу СПН ВПТ во всех 4 квадрантах диаграммы мощности, в том числе в режиме управляемого компенсатора при отсутствии передачи активной мощности [15, 19, 84]. Для этого предусматривается преобразование мгновенных значений напряжений и токов $ABC \Leftrightarrow d, q, 0$ и расчет управляющих воздействий САУ по значениям амплитуд проекций U_d, U_q изображающего вектора трехфазной системы U_{abc} на оси d и q вращающейся с синхронной частотой сети ω двухфазной dq системы координат и угла θ между осью d и вектором напряжения фазы А, а также проекций I_d, I_q и мгновенных значений мощности $s(t), q(t), p(t)$.

В соответствии с представленной на рисунке 4.24 функциональной схемой САУ ВПТ одного из СПН и приведённой ранее структурной схемой МПУ СГП ВПТ (рис.3.11) функции обработки и фильтрации измерений U_{abc}, I_{abc} , расчета параметров $(s(t), q(t), p(t), U_{dq_уст}, U_{авс_уст}, I_{dq_уст}$ и др.), преобразования координат

$ABC \Leftrightarrow d, q, 0$ осуществляются в процессоре аналого-цифрового преобразования (ПАЦП САУ), а широтно-импульсная модуляция (ШИМ) выполняется в процессоре коммутации (ПК).

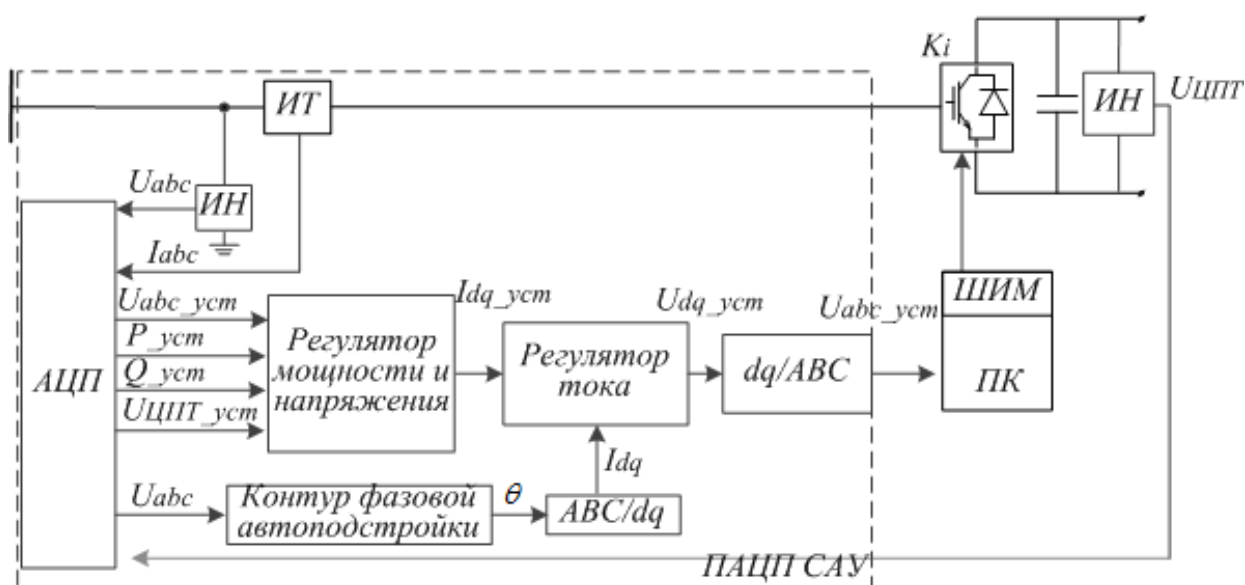


Рисунок 4.24 – Функциональная схема САУ ВПТ одного из СПН, где ИН – измеритель напряжения, ИТ – измеритель тока, ABC/dq и dq/ABC – блоки прямого и обратного преобразования координат

4.3.1 Тестовые исследования процессора аналого-цифрового преобразования системы автоматического управления

Функциональная обработка и подготовка данных для реализации САУ ВПТ осуществляется в ПАЦП САУ. Данная процедура выполняется циклически (основной цикл составляет 200 мкс и включает четыре кванта по 50 мкс каждый), с необходимыми операциями прерывания: проверка и чтение АЦП, запись массива данных, обслуживание UART (передача данных в ПК, запись данных в буфер, чтение уставок регуляторов от ЦП) и синхронизации времени ЦП и ПЦАП по шине CAN.

С учетом вышеобозначенного процедура каждого цикла программы ПАЦП САУ определяется следующим алгоритмом:

- 1) начало программы (активизация необходимых подпрограмм работы CAN, DBGU; UART, SPI, PIO и др.);
- 2) инициализация буферов (выделение ячеек памяти для размещения измеряемых и рассчитываемых данных (U_{abc} , I_{abc} , $s(t)$, $q(t)$, $p(t)$, $U_{dq_уст}$, $U_{авс_уст}$, $I_{dq_уст}$ и др.), параметров, портов и периферии микроконтроллера (активизация программируемых вводов-выводов (PIO), CAN, DBGU, UART, SPI);
- 3) запуск главного цикла «while(1)»:
 - 3.1) запуск процедуры синхронизации времени (каждые 50 мкс);
 - 3.2) выбор кванта программы (основной цикл программы составляет 200 мкс и включает четыре кванта по 50 мкс каждый):

Квант 0:

Проверка готовности данных АЦП;
 Инкремент указателя кванта для записи;
 Чтение АЦП;
 Цифровая фильтрация (с корректировкой смещения);
 Преобразование координат ABC/dq;
 Расчет мгновенных значений мощностей;
 Запись расчетных значений в массив данных;
 Запись массива данных значений САУ;

Квант 1:

Чтение заданных значений для регулятора U, Q, P от ЦП или рассчитанных по текущим значениям;
 Цифровая фильтрация;
 Преобразование координат dq/ABC;
 Обслуживание UART (передача пакета данных в ПК);
 Перезапись по зарезервированным адресам массива данных значений САУ;

Квант 2:

Проверка готовности данных АЦП;
 Инкремент указателя кванта для записи;
 Чтение АЦП;
 Цифровая фильтрация (с корректировкой смещения);
 Преобразование координат ABC/dq;
 Расчет мгновенных значений мощностей;
 Запись расчетных значений в массив данных;

Запись массива данных значений САУ;

Квант 3:

Расчет выходного сигнала регулятора U;

Расчет выходного сигнала регулятора Q;

Цифровая фильтрация;

Расчет выходного сигнала регулятора P;

Преобразование координат dq/ABC;

Обслуживание UART (передача пакета данных в ПК);

Перезапись по зарезервированным адресам массива данных значений САУ;

На рисунке 4.25 представлена блок-схема вышеобозначенной программы ПАЦП САУ.

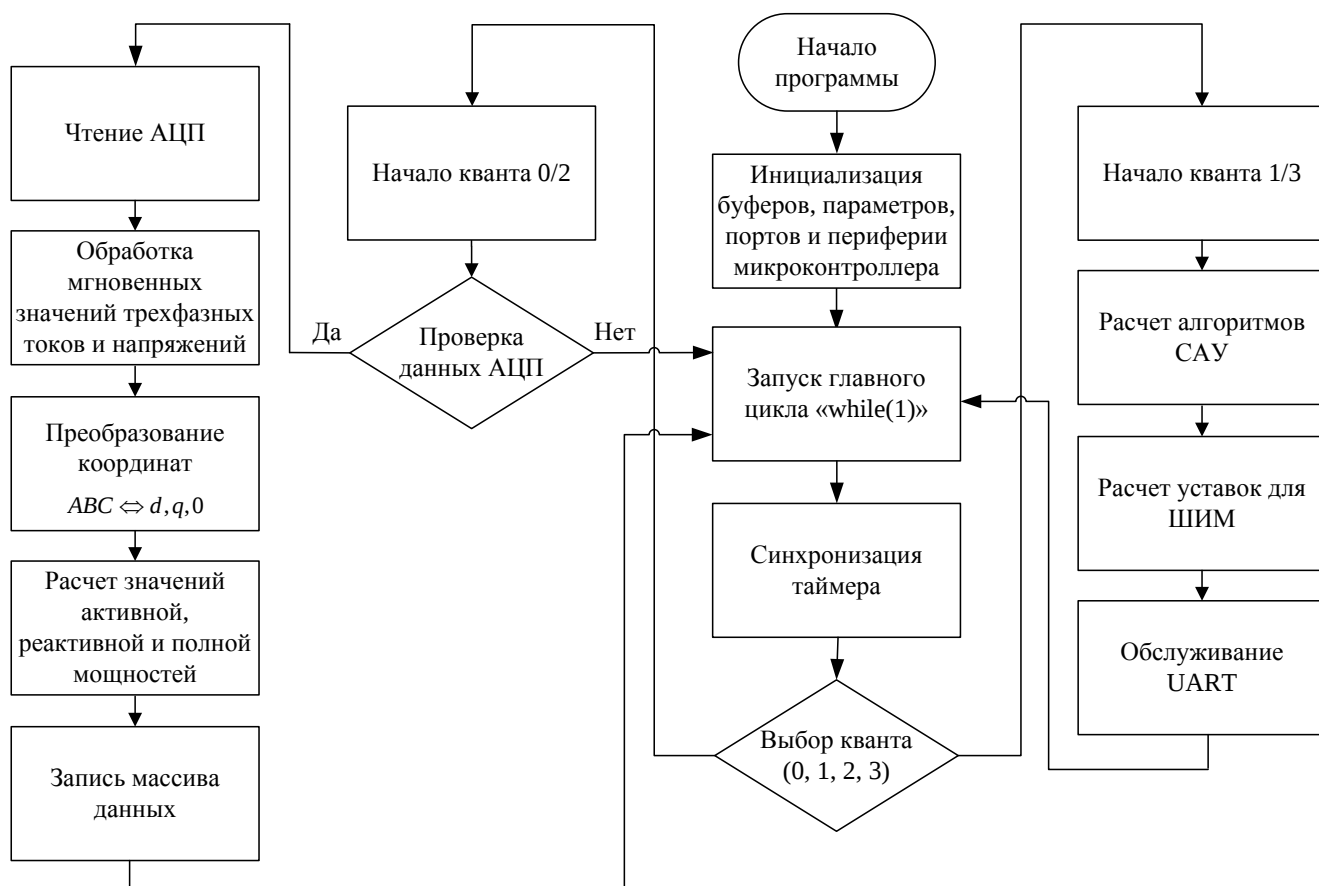


Рисунок 4.25 – Блок-схема алгоритмов программы ПАЦП САУ

Фрагмент программного кода тестирования временных характеристик квантов главного цикла «while (1)» ПАЦП САУ приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Фрагмент программного кода тестирования временных характеристик квантов главного цикла «while (1) ПАЦП САУ

```

while(1)
{
    // начало выполнения программы, выбор
кванта
case 0:
    // Четный квант для чтения АЦП и т.д.
    *AT91C_PIOB_CODR = PB_Test;
    // Установка тестового сигнала
    if(!(*AT91C_PIOB_PDSR & PB_EOLC1))// Проверка готовности данных АЦП
    {
        NQ = curMainCounter;
        // Заполнение данных текущего кванта
        *AT91C_PIOB_SODR = PB_Test;
        // Снятие тестового сигнала
        // Формирование квантов
        IncrementQWS();
        // Заполнение данных текущего кванта
        *AT91C_PIOB_CODR = PB_Test;
        // Установка тестового сигнала
        ReadADC();
        // Чтение АЦП
        *AT91C_PIOB_SODR = PB_Test;
        // Снятие тестового сигнала
        Solv_Filter();
        // Цифровая фильтрация
        *AT91C_PIOB_CODR = PB_Test;
        // Установка тестового сигнала
        Abc_Dq();
        // Преобразование координат ABC/dq
        *AT91C_PIOB_SODR = PB_Test;
        // Снятие тестового сигнала
        SC_correction();
        // Корректировка смещения
        SolvePQS();
        // Расчет мгновенных значений
    }
    // Заполнение данных текущего кванта
    *AT91C_PIOB_CODR = PB_Test;
    // Установка тестового сигнала
    WrightStaticBase();
    // Запись расчетных значений в массив
    *AT91C_PIOB_SODR = PB_Test;
    // Снятие тестового сигнала
}
break;
case 1:
    *AT91C_PIOB_CODR = PB_Test;
    // Установка тестового сигнала
    NQ = curMainCounter;
    // Заполнение данных текущего кванта
    *AT91C_PIOB_SODR = PB_Test;
    // Снятие тестового сигнала
    Read_Ref_Raram();
    // Чтение заданных значений для
регулятора U, Q, P от ЦП или рассчитанных по текущим значениям;

```

Таблица 2 – Продолжение

*AT91C_PIOB_CODR = PB_Test;	// Установка тестового сигнала
U_Controller();	// Расчет выходного сигнала регулятора U
*AT91C_PIOB_SODR = PB_Test;	// Снятие тестового сигнала
Q_Controller();	// Расчет выходного сигнала регулятора Q
*AT91C_PIOB_CODR = PB_Test;	// Установка тестового сигнала
P_Controller();	// Расчет выходного сигнала регулятора P
*AT91C_PIOB_SODR = PB_Test;	// Снятие тестового сигнала
Dq_Abc();	// Преобразование координат dq/ABC
*AT91C_PIOB_CODR = PB_Test;	// Установка тестового сигнала
CommandUART0();	// Передача данных в ПК по UART0
*AT91C_PIOB_SODR = PB_Test;	// Снятие тестового сигнала
break;	
case 2:	// Четный квант для чтения АЦП и т.д.
*AT91C_PIOB_CODR = PB_Test;	// Установка тестового сигнала
if(!(*AT91C_PIOB_PDSR & PB_EOLC1))	// Проверка готовности данных АЦП
{	
NQ = curMainCounter;	// Заполнение данных текущего кванта
ReadADC();	// Чтение АЦП
Solv_Filter();	// Цифровая фильтрация
Abc_Dq();	// Преобразование координат ABC/dq
SC_correction();	// Корректировка смещения
SolvePQS();	// Расчет мгновенных значений мощностей
WrightStaticBase();	// Запись расчетных значений в массив данных
*AT91C_PIOB_SODR = PB_Test;	// Снятие тестового сигнала
}	
break;	
case 3:	
*AT91C_PIOB_CODR = PB_Test;	// Установка тестового сигнала
NQ = curMainCounter;	// Заполнение данных текущего кванта
U_Controller();	// Расчет выходного сигнала регулятора U
Q_Controller();	// Расчет выходного сигнала регулятора Q
P_Controller();	// Расчет выходного сигнала регулятора P
Dq_Abc();	// Преобразование координат dq/ABC
CommandUART0();	// Передача данных в ПК по UART0

Таблица 2 – Продолжение

ReadyQWS();	// Квант для чтения = кванту для записи
*AT91C_PIOB_SODR = PB_Test;	// Снятие тестового сигнала
break;	
default:	
break;	
}	// завершение выполнения программы

Для подтверждения адекватности выполнения программы ПАЦП САУ приведены сводная таблица временных характеристик программы и диаграмма распределения времени её выполнения в микроконтроллере at91sam7x256 [85].

Таблица 3 – Затраты времени на выполнение программы
ПАЦП САУ

Процедура	Временные затраты
ПАЦП САУ	
Чтение АЦП	13 мкс
Цифровая фильтрация измеренных данных	4 мкс
Преобразование $ABC \rightarrow d, q, 0$	15 мкс
Расчет $p(t), q(t), s(t)$	3 мкс
Чтение заданных значений для регулятора U, Q, P от ЦП или рассчитанных по текущим значениям	1 мкс
Расчет уставок регулятора U	2,4 мкс
Расчет уставок регулятора Q	2,7 мкс
Расчет уставок регулятора P	2,7 мкс
Преобразование $d, q, 0 \rightarrow ABC$	2,5 мкс
Передача данных в ПК по UART0	2 мкс

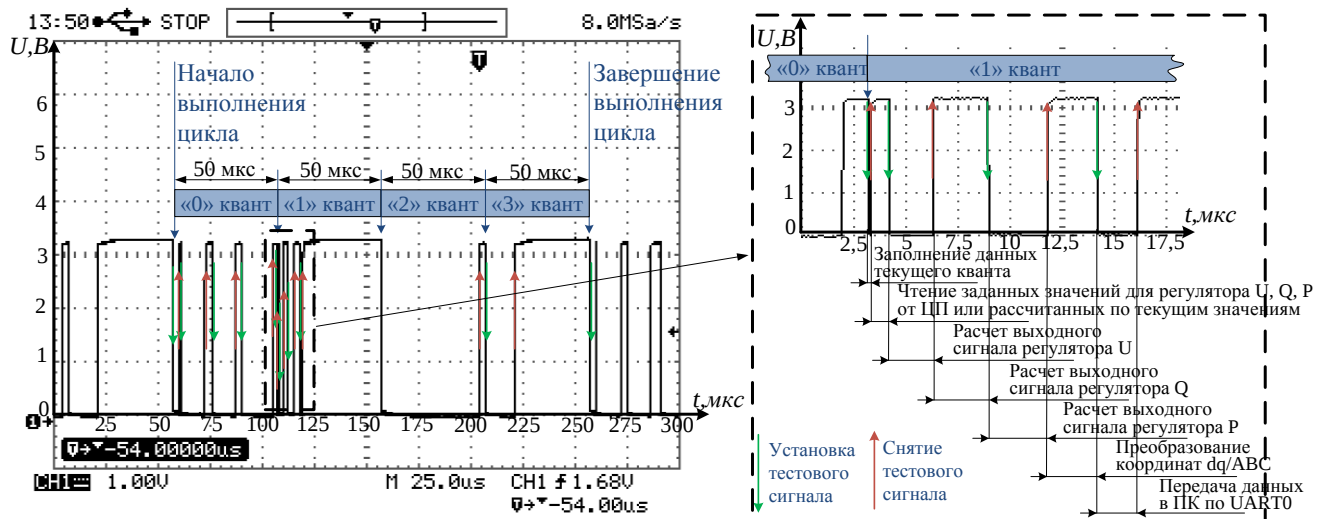


Рисунок 4.26 – Диаграмма распределения времени выполнения операций программы ПАЦП САУ

4.3.2 Тестовые исследования процессора коммутации

Согласно представленным ранее положениям концепции выполнение широтно-импульсной модуляции (ШИМ) осуществляется в процессоре коммутации (ПК). Данная процедура выполняется циклически с необходимыми операциями прерывания: обслуживание UART (прием данных от ПАЦП САУ или ЦП, проверка целостности пакета данных, запись данных в буфер, сброс счетчика UART) и CAN (опрос состояния ЦУАК, проверка функционирования/изменения состояния ЦУАК).

С учетом вышеобозначенного процедура каждого цикла программы ПК ЦУ ФМ СПН определяется следующим алгоритмом:

- 1) начало программы (активизация необходимых подпрограмм работы CAN, DBGU; UART, SPI, PIO и др.);
- 2) инициализация буферов (выделение ячеек памяти для размещения полученных от ПАЦП или ЦП данных: (U_{abc} , I_{abc} , $U_{dq_уст}$, $U_{abc_уст}$, $I_{dq_уст}$ и др.);
- 3) инициализация параметров, портов и периферии микроконтроллера (активизация программируемых вводов-выводов (PIO), CAN, DBGU, UART, SPI, а также задание частоты ШИМ);

4) запуск главного цикла «while(1)»:

4.1) реализация процедуры ШИМ (сравнение опорного и несущего сигналов, формирование импульсов управления).

Операции прерывания включены в алгоритм через равные интервалы времени (с учетом готовности/обновления данных по UART и CAN) и после выполнения процедуры ШИМ (ориентированы на время переключения ключа).

На рисунке 4.28 представлена блок-схема вышеобозначенной программы ПК ЦУ ФМ СПН.

Фрагмент программного кода тестирования временных характеристик главного цикла «while (1) ПК ЦУ ФМ СПН приведен в таблице 4.

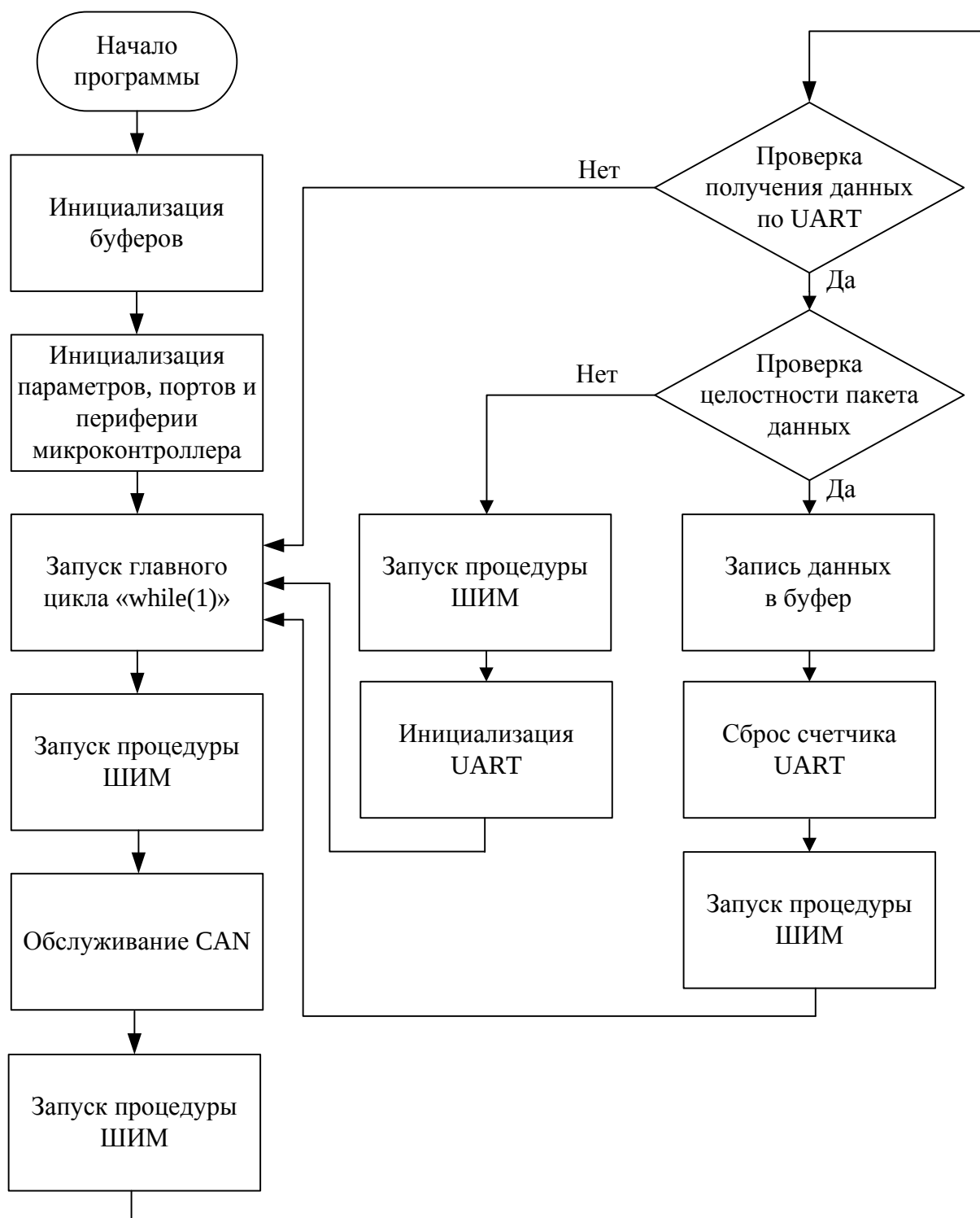


Рисунок 4.27 – Блок-схема алгоритмов программы ПК ЦУ ФМ СПН

Таблица 4 – Фрагмент программного кода тестирования временных характеристик главного цикла «while (1) ПК ЦУ ФМ СПН

```

while(1)
{
    *AT91C_PIOA_CODR = PA_VKL4_1_B;    // Установка тестового сигнала
    PWM_upd();                          // Выполнение процедуры ШИМ
    PWM_upd();                          // Выполнение процедуры ШИМ
    PWM_upd();                          // Выполнение процедуры ШИМ
    *AT91C_PIOA_SODR = PA_VKL4_1_B;    // Снятие тестового сигнала
        CAN_commonSurvey();             // Опрос CAN_common
        CAN_individualSurvey();         // Опрос CAN_individual
        SurveyCanAnswer();              // Опрос CAN_Answer
    *AT91C_PIOA_CODR = PA_VKL4_1_B;    // Установка тестового сигнала
    PWM_upd();                          // Выполнение процедуры ШИМ
    PWM_upd();                          // Выполнение процедуры ШИМ
    PWM_upd();                          // Выполнение процедуры ШИМ
    *AT91C_PIOA_SODR = PA_VKL4_1_B;    // Снятие тестового сигнала
    if (GetByteDmaUart1() == 0)         // Проверка получения данных
                                        // по UART
    {
        if (GetValueUart1(0) != (short)0xAAAA) // Проверка целостности пакета
                                                // данных
        {
            *AT91C_PIOA_CODR = PA_VKL4_1_A; // Установка тестового сигнала
            PWM_upd();                      // Выполнение процедуры ШИМ
            PWM_upd();                      // Выполнение процедуры ШИМ
            PWM_upd();                      // Выполнение процедуры ШИМ
            PWM_upd();                      // Выполнение процедуры ШИМ
            InitUART1();                    // Инициализация UART
            *AT91C_PIOA_SODR = PA_VKL4_1_A; // Снятие тестового сигнала
        }
        else
        {
            *AT91C_PIOA_CODR = PA_VKL4_1_B;    // Установка тестового сигнала

```

Таблица 4 – Продолжение

PWM_upd();	// Выполнение процедуры ШИМ
*AT91C_PIOA_SODR = PA_VKL4_1_B;	// Снятие тестового сигнала
Dq_Abc_Buff1[6] = GetValueUart1(3);	// Получение данных с САУ АЦП
Dq_Abc_Buff1[7] = GetValueUart1(4);	// Получение данных с САУ АЦП
Dq_Abc_Buff1[8] = GetValueUart1(5);	// Получение данных с САУ АЦП
*AT91C_PIOA_CODR = PA_VKL4_1_B;	// Установка тестового сигнала
PWM_upd();	// Выполнение процедуры ШИМ
PWM_upd();	// Выполнение процедуры ШИМ
PWM_upd();	// Выполнение процедуры ШИМ
*AT91C_PIOA_SODR = PA_VKL4_1_B;	// Снятие тестового сигнала
SetDmaBuffer();	// Сброс счетчика UART
*AT91C_PIOA_CODR = PA_VKL4_1_B;	// Установка тестового сигнала
PWM_upd();	// Выполнение процедуры ШИМ
PWM_upd();	// Выполнение процедуры ШИМ
PWM_upd();	// Выполнение процедуры ШИМ
*AT91C_PIOA_SODR = PA_VKL4_1_B;	// Снятие тестового сигнала
}	
}	
}	
}	// завершение выполнения программы

Согласно представленной на рисунке 4.28 диаграмме распределения времени выполнения в микроконтроллере at91sam7x256 операций программы ПК ЦУ ФМ СПН, совокупные затраты на реализацию ШИМ составляют 5,75 мкс, что гарантированно позволяет осуществлять её моделирование в реальном времени.

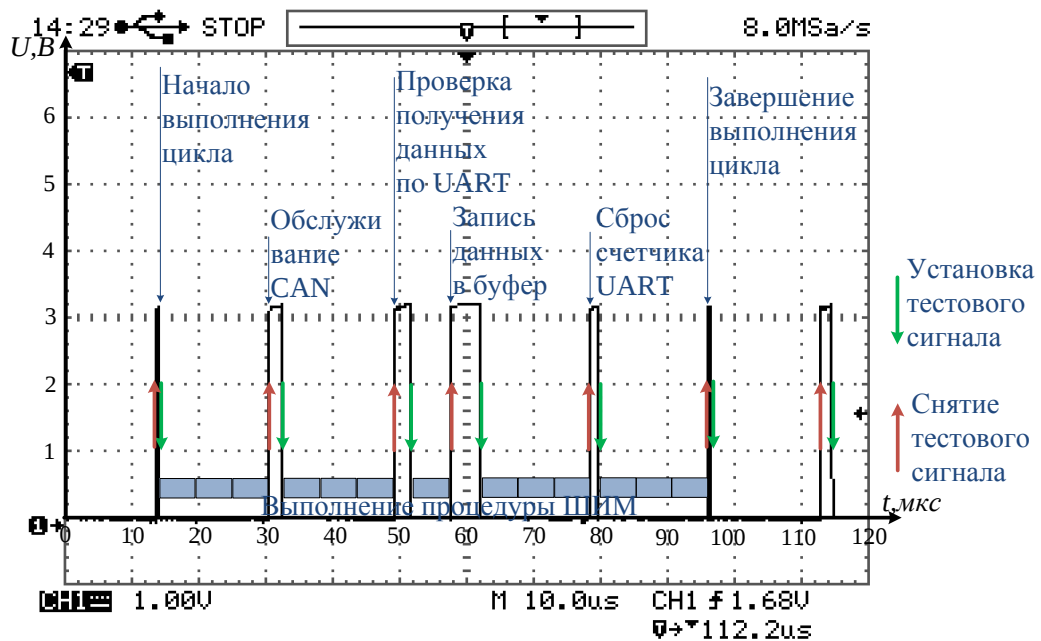


Рисунок 4.28 – Диаграмма распределения времени выполнения операций программы ПК ЦУ ФМ СПН

4.4 Выводы

1. Проведённые тестовые исследования компьютерных моделей специализированных параллельных цифро-аналоговых структур реализации математических моделей силового оборудования, соответствующих ГСП Т, ГСП ФВГ, ГСП Р и ГСП ЦПТ, подтверждают их адекватность и реализуемость требуемых частотных характеристик до 10 кГц в диапазоне задаваемых параметров реального силового оборудования.
2. Тестовые исследования ЦУ ФМ СПН и ЦУ ФМ ППК показали адекватность моделирования коммутационных процессов СПН и ППК.
3. Разработанная структура МПУ обеспечивает все необходимые информационно-управляющие функции для обеспечения в реальном времени процессов моделирования, управления и наблюдения.
4. Разработанный согласно концепции всережимного моделирования функционирования ВПТ в электроэнергетических системах СП ВПТ обеспечивает адекватное всережимное трехфазное бездекомпозиционное моделирование в реальном времени ВПТ с учетом функционирования его САУ.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДСТВ ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СОСТАВЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для подтверждения свойств и возможностей собственно разработанного специализированного гибридного процессора вставки постоянного тока (СГП ВПТ) и в составе Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) с помощью созданных экспериментальных средств всережимного моделирования вставки постоянного тока (ВПТ) в составе модели электроэнергетической системы (ЭЭС) проведен комплекс исследований воспроизведения процессов в реальной ЭЭС с ВПТ: объединения несинхронно работающих частей ЭЭС, регулирования, включая реверс мощности через ВПТ между объединяемыми частями ЭЭС, влияния ВПТ на различные аварийные процессы в ЭЭС.

Данные исследования проведены на примере Томской ЭЭС, состоящей из двух несинхронно работающих частей – Северной и Южной, разделенных на ПС Парабель (рис. 5.1 и 5.2).

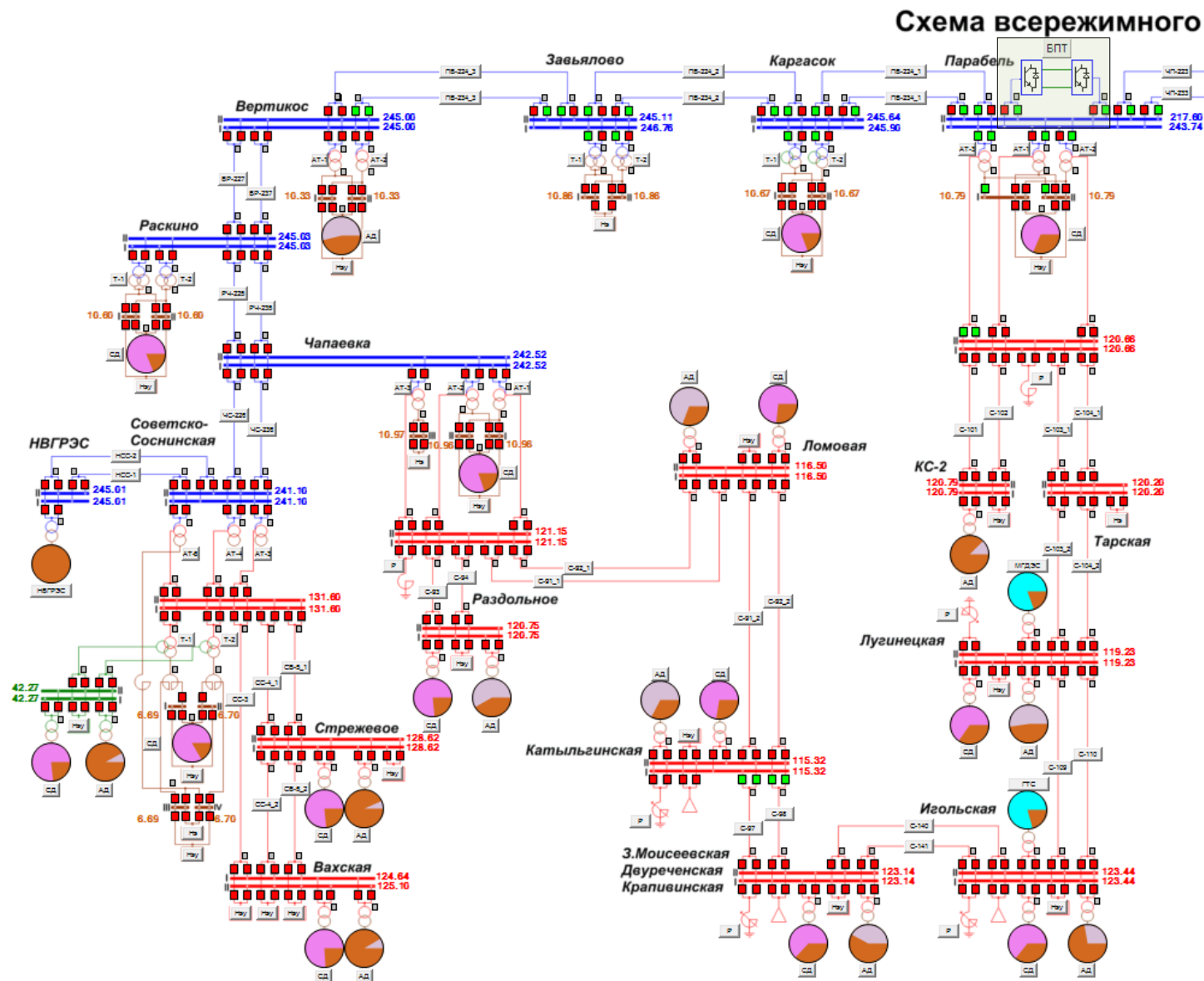


Рисунок 5.1 – Схема всережимного моделирования Северной части Томской ЭЭС

моделирования Томской ЭЭС

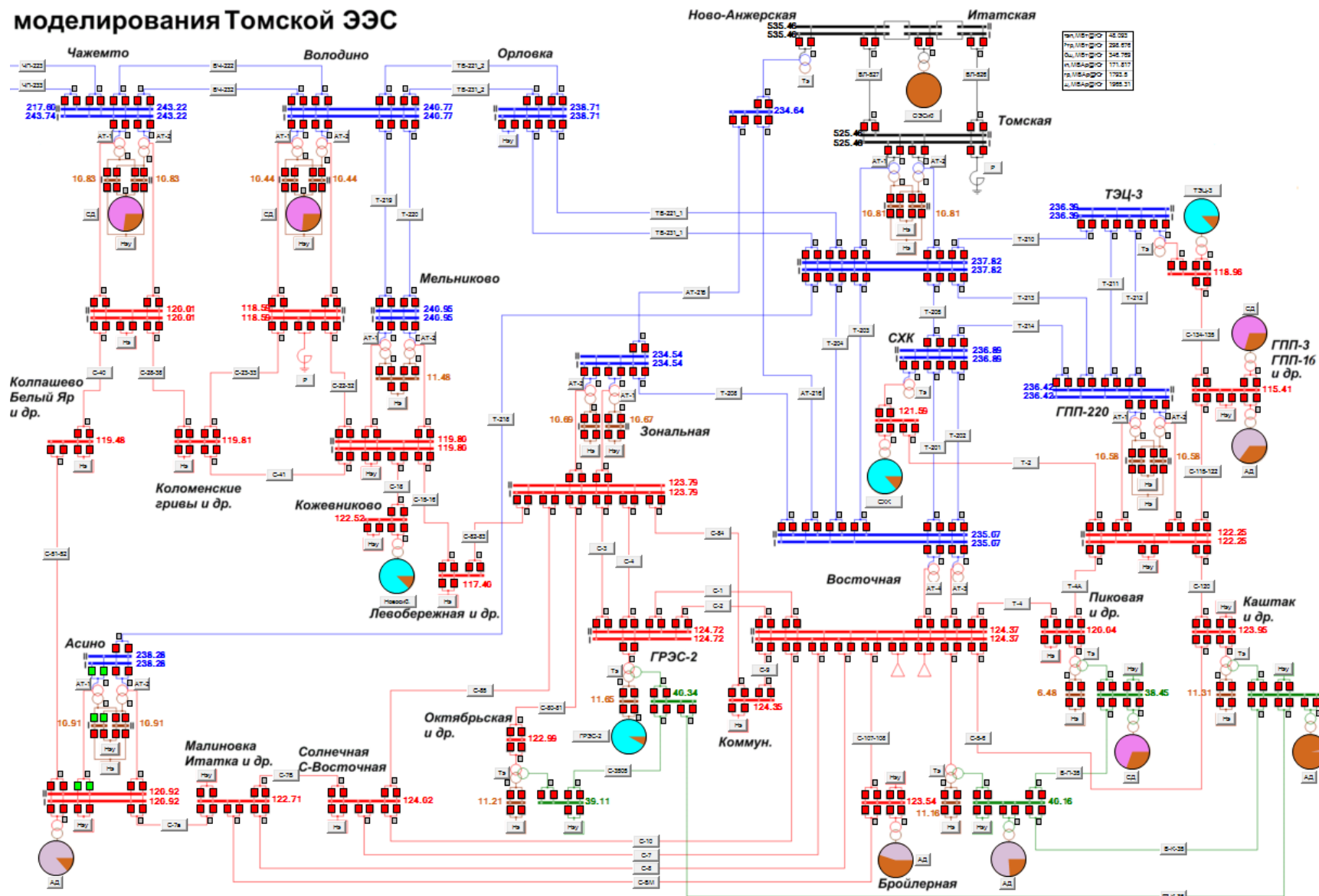


Рисунок 5.2 – Схема все режимного моделирования Южной части Томской ЭЭС

5.1. Моделирование процессов объединения несинхронно работающих частей Томской ЭЭС с помощью ВПТ

Для повышения надежности и эффективности функционирования Томской ЭЭС актуальным является объединение её несинхронно работающих частей, одним из наиболее эффективных путей осуществления которого является ВПТ, позволяющая оперативно реализовать данное объединение операции без необходимости выполнения обычных операций по синхронизации.

Тем более, что для выявления конкретных условий синхронизации, необходимы специальные исследования, в частности, считающиеся допустимым для синхронизации угол между напряжениями $\delta \leq 70^\circ$ [86, 87] в данном конкретном случае оказывается неприемлемым.

Согласно представленным в [88] результатам исследования процессов объединения на параллельную работу Северной и Южной частей Томской ЭЭС максимальное значение угла между напряжениями на шинах ПС Парабель, при котором возможна синхронизация, составляет 47° . Однако, проведённые с помощью разработанных средств всережимного адекватного моделирования в реальном времени ЭЭС исследования показывают, что данное объединение при возможных режимных условиях допустимо при $\delta \leq 29^\circ$ (рис. 5.3).

Отмеченное обстоятельство указывает на целесообразность и предпочтительность применения ВПТ для гарантированного и надежного решения задачи объединения несинхронно работающих ЭЭС и их частей в данном случае Томской ЭЭС, что убедительно и наглядно иллюстрируют приведенные на рисунках 5.4 – 5.5 результаты моделирования процессов такого объединения, выполненные с помощью разработанных средств всережимного адекватного моделирования функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом.

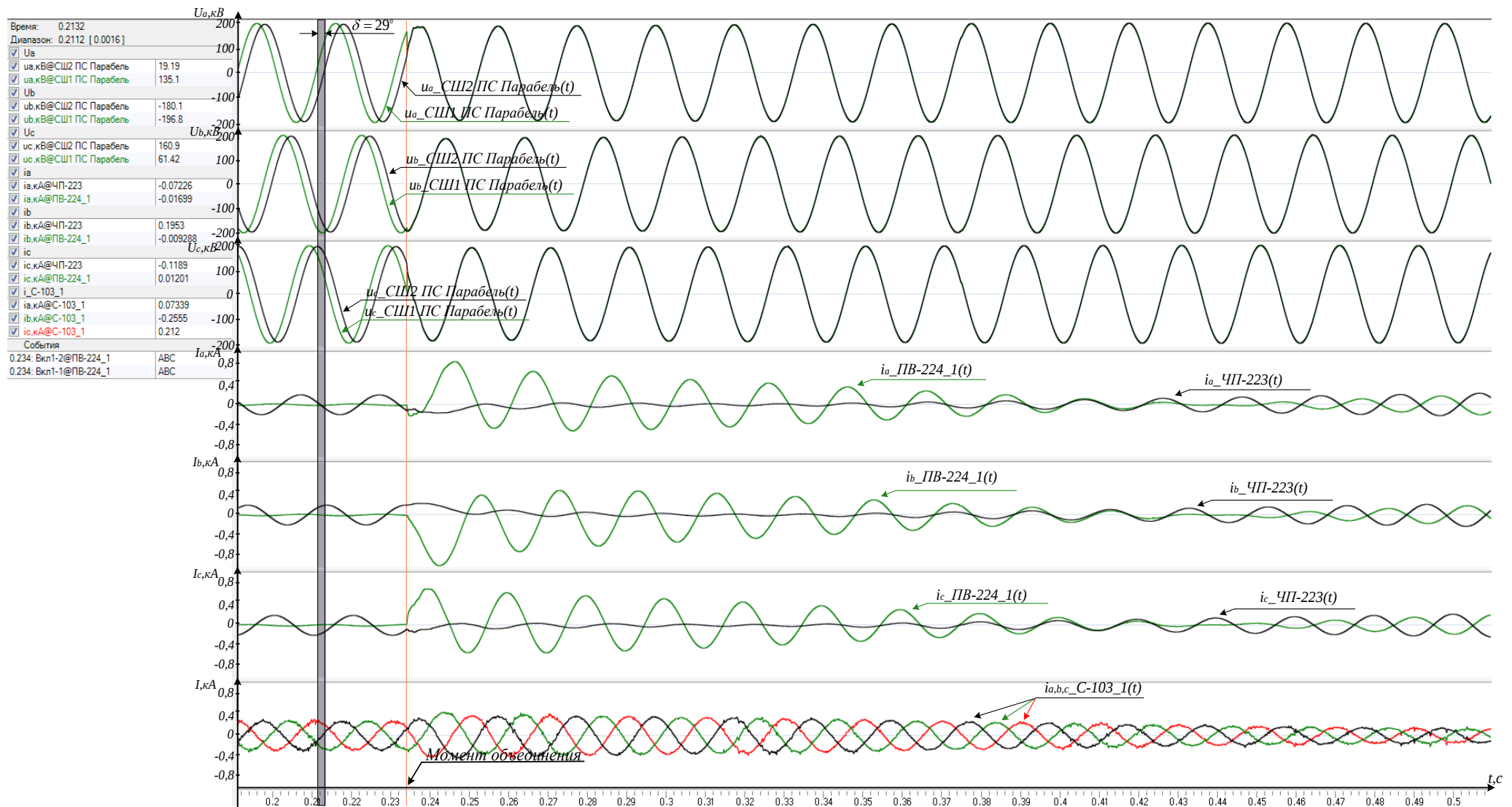


Рисунок 5.3 – Объединение несинхронно работающих частей Томской ЭЭС на параллельную работу на ПС Парabel при $\delta \approx 29^\circ$

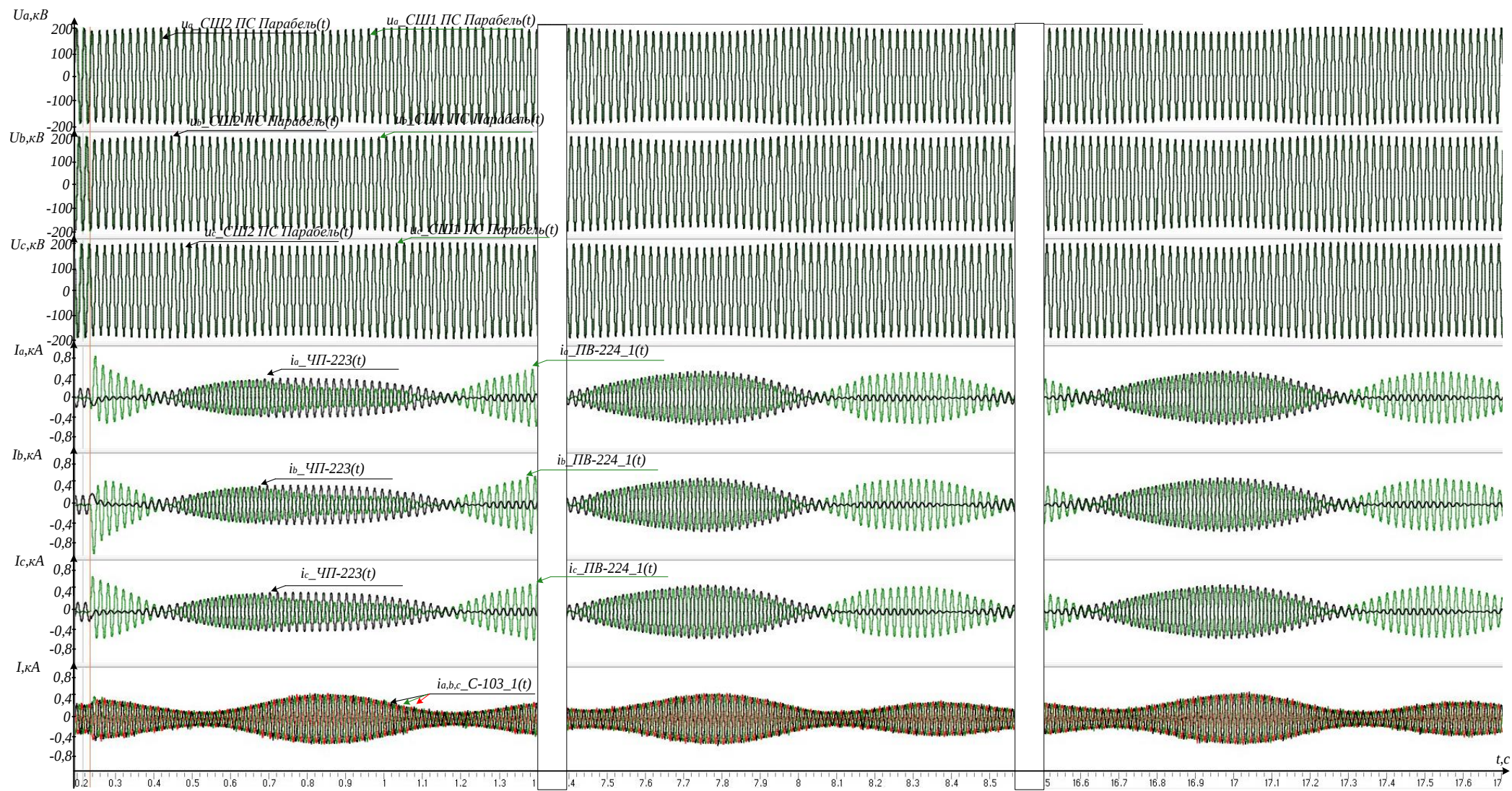


Рисунок 5.3 – Продолжение

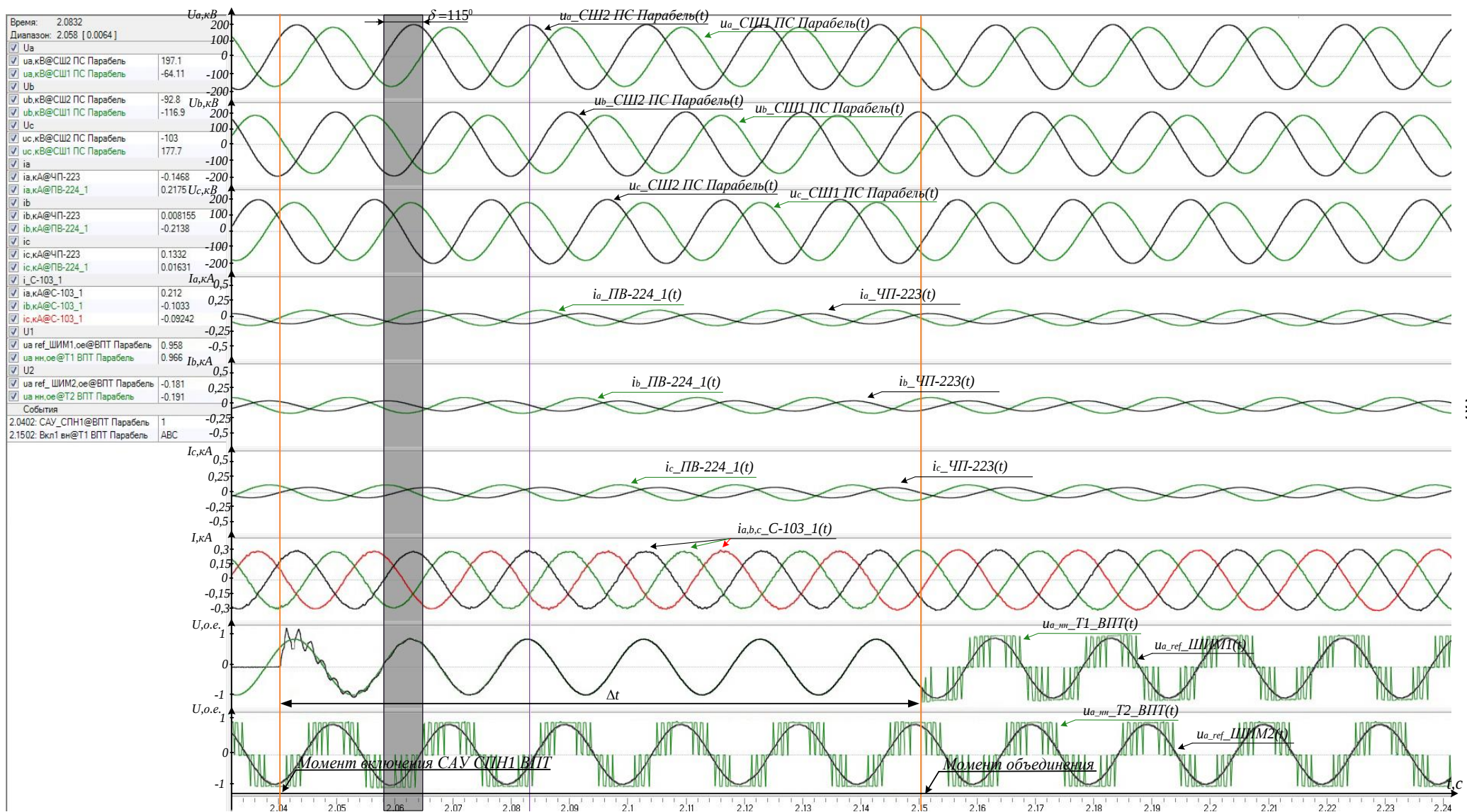


Рисунок 5.4 – Объединение несинхронно работающих частей Томской ЭЭС с помощью ВПТ на ПС Парabelь при $\delta \approx 115^\circ$, где Δt – время включения выключателя

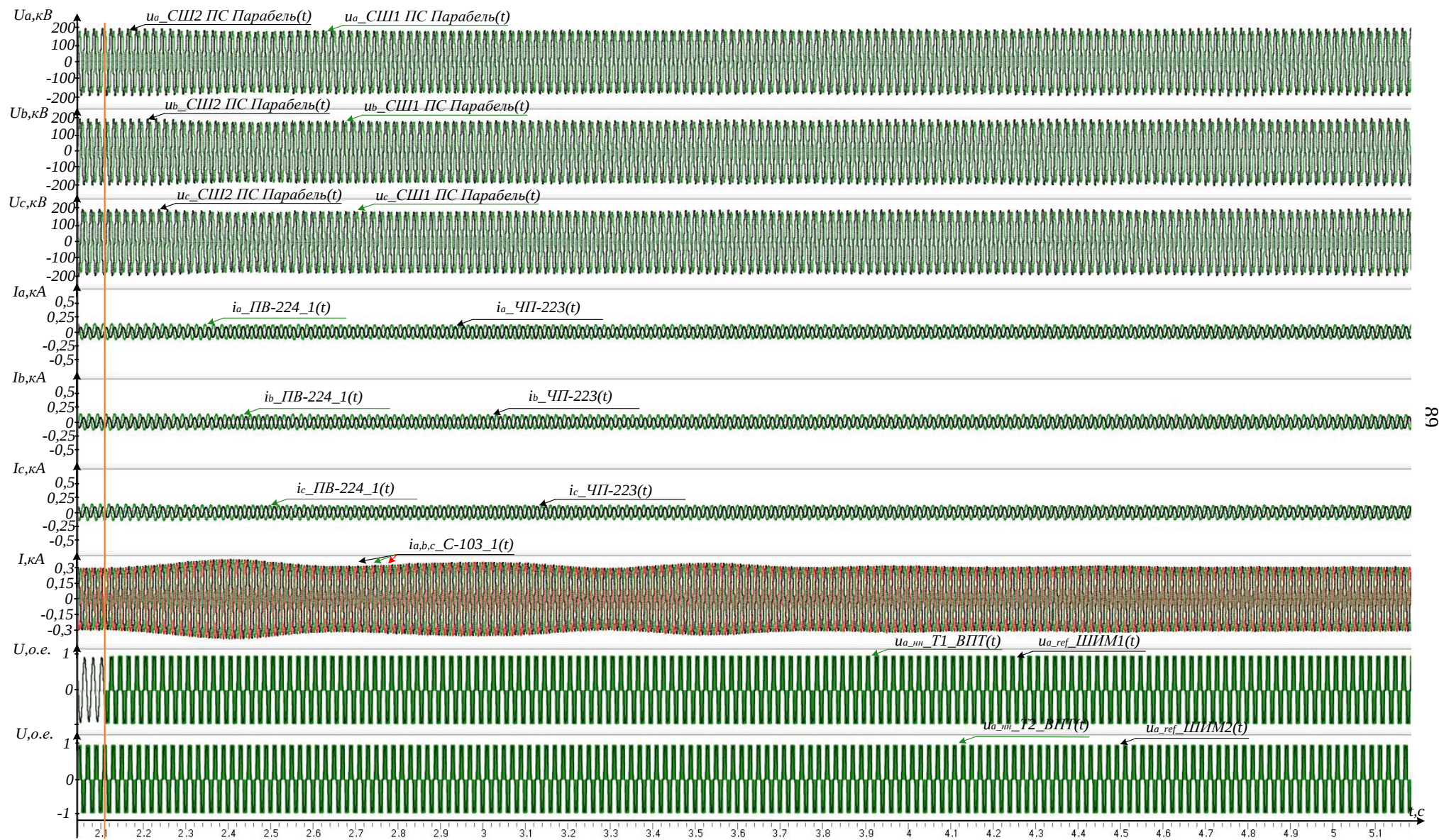


Рисунок 5.4 – Продолжение

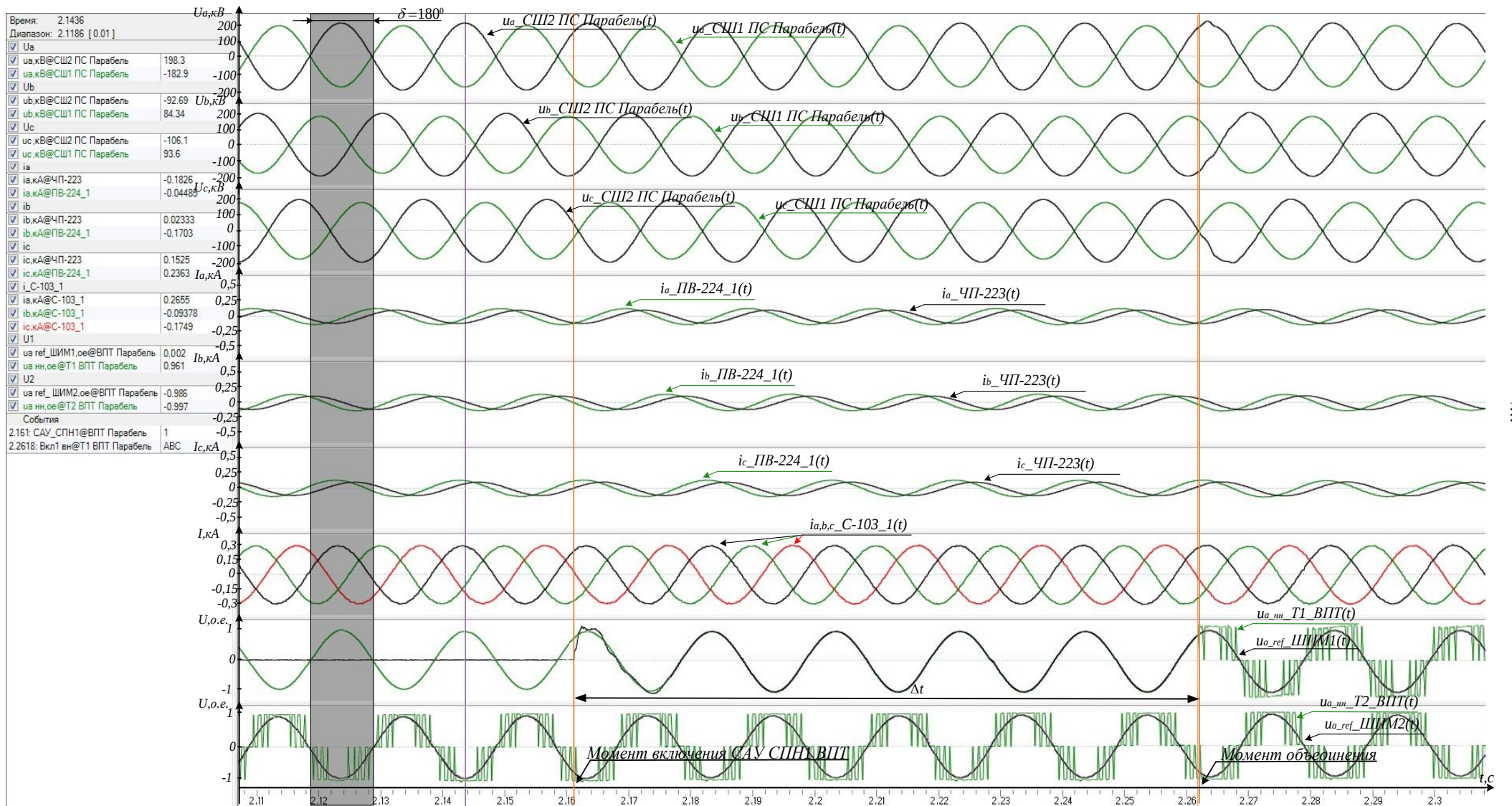


Рисунок 5.5 – Объединение несинхронно работающих частей Томской ЭЭС с помощью ВПТ на ПС Парабель при $\delta \approx 180^\circ$, где Δt – время включения выключателя

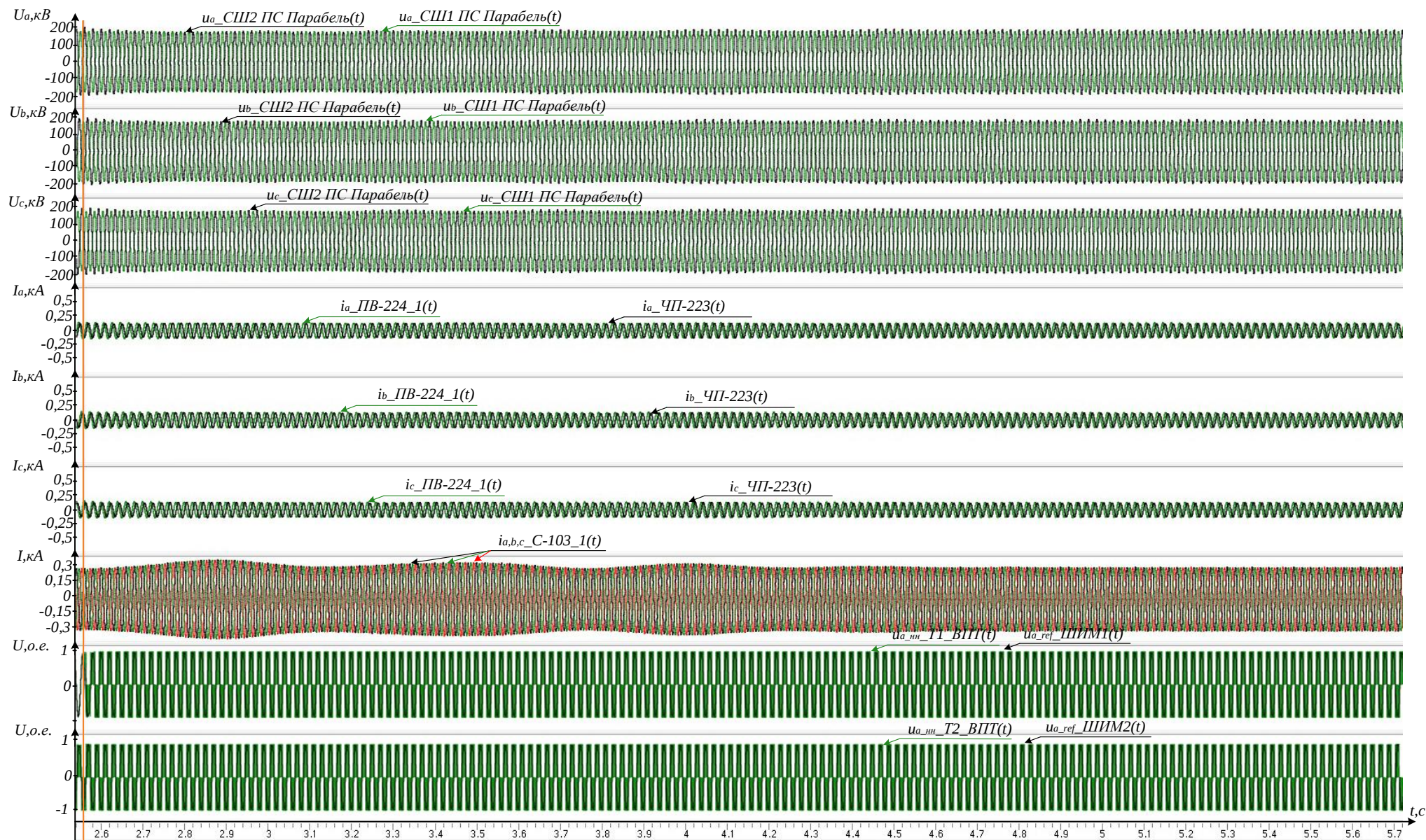


Рисунок 5.5 – Продолжение

5.2. Моделирование процессов регулирования и реверса мощности с помощью ВПТ

Переток мощности через ВПТ в квазиустановившемся режиме Томской ЭЭС отражает динамическая панель наблюдения и управления (ДПНУ) программного обеспечения созданного экспериментального средства всережимного моделирования функционирования ВПТ в составе ЭЭС (рис. 5.6).

ВПТ (Парабель)

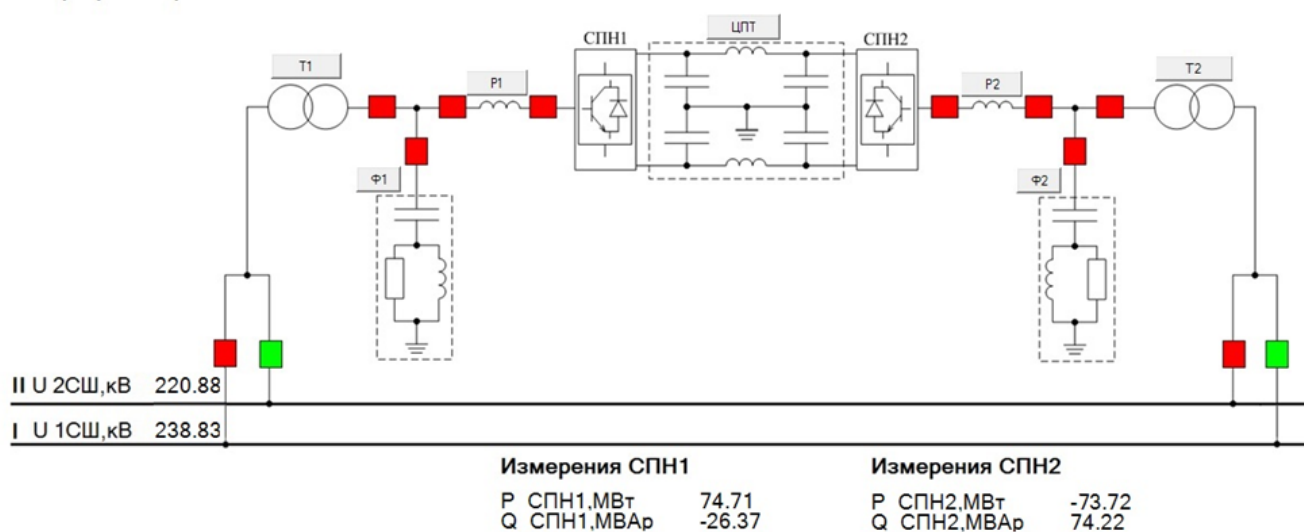


Рисунок 5.6 – ДПНУ СГП ВПТ, отражающая текущее схемно-режимное состояние района Томской ЭЭС и переток мощности через ВПТ между объединенными её частями

Результаты вышеуказанного моделирования процессов регулирования и реверса перетока мощности, отражающего регулирование на интервале $(t_1 - t_2)$; реверса мощности в моменты времени t_2 , t_3 и последующего регулирования, приведены на рисунке 5.7.

Изменение перетока мощности, сопровождающееся изменениями уровня напряжения на конденсаторной батарее цепи постоянно тока и реактивной мощности, осуществляется за время $t_{\text{РЕВЕРСА}} = (0,1 \div 0,4) \text{ с}$, и соответствует приводимым в опубликованной информации натурным данным времени изменения перетока мощности ВПТ [89, 90].

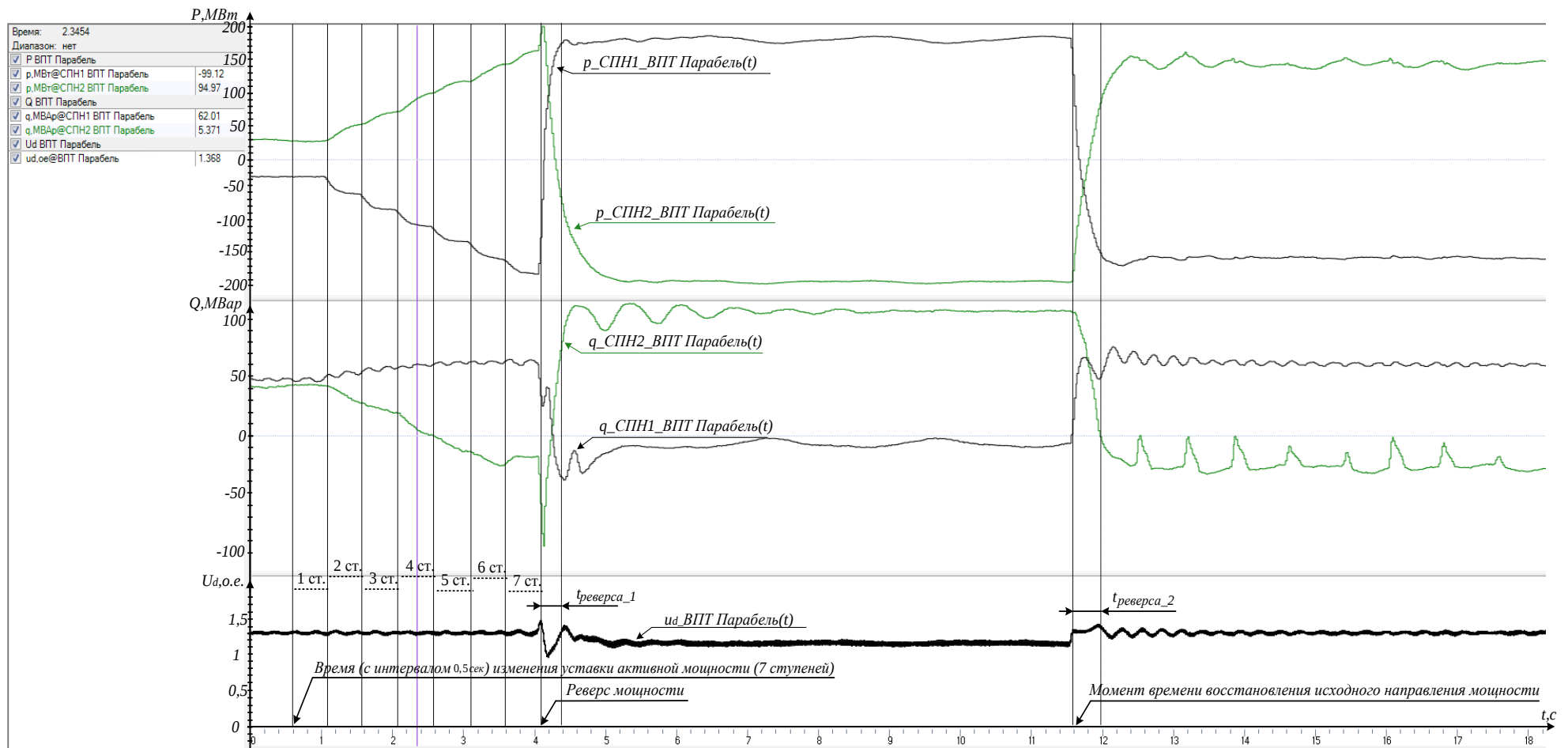


Рисунок 5.7 – Процессы регулирования перетока мощности через ВПТ

5.3. Моделирование влияния функционирования ВПТ на аварийные процессы в ЭЭС

Экспериментальные исследования влияния ВПТ на аварийные процессы в ЭЭС проведены применительно к наиболее тяжелому виду аварийного возмущения – трехфазному короткому замыканию (КЗ) [6, 91–92].

Представленные на рисунках 5.8 – 5.9 осциллограммы токов, напряжений и мощности подтверждают положительное влияние ВПТ на аварийные процессы в ЭЭС: снижается уровень токов КЗ и колебаний в ЭЭС при КЗ, а также, уменьшается взаимовлияние КЗ в объединяемых частях ЭЭС. Кроме того, ВПТ позволяет демпфировать колебания в переходном процессе, в результате чего повышается устойчивость функционирования узлов нагрузки, особенно двигательной, в частности синхронной на ПС Каргасок (рис. 5.10).

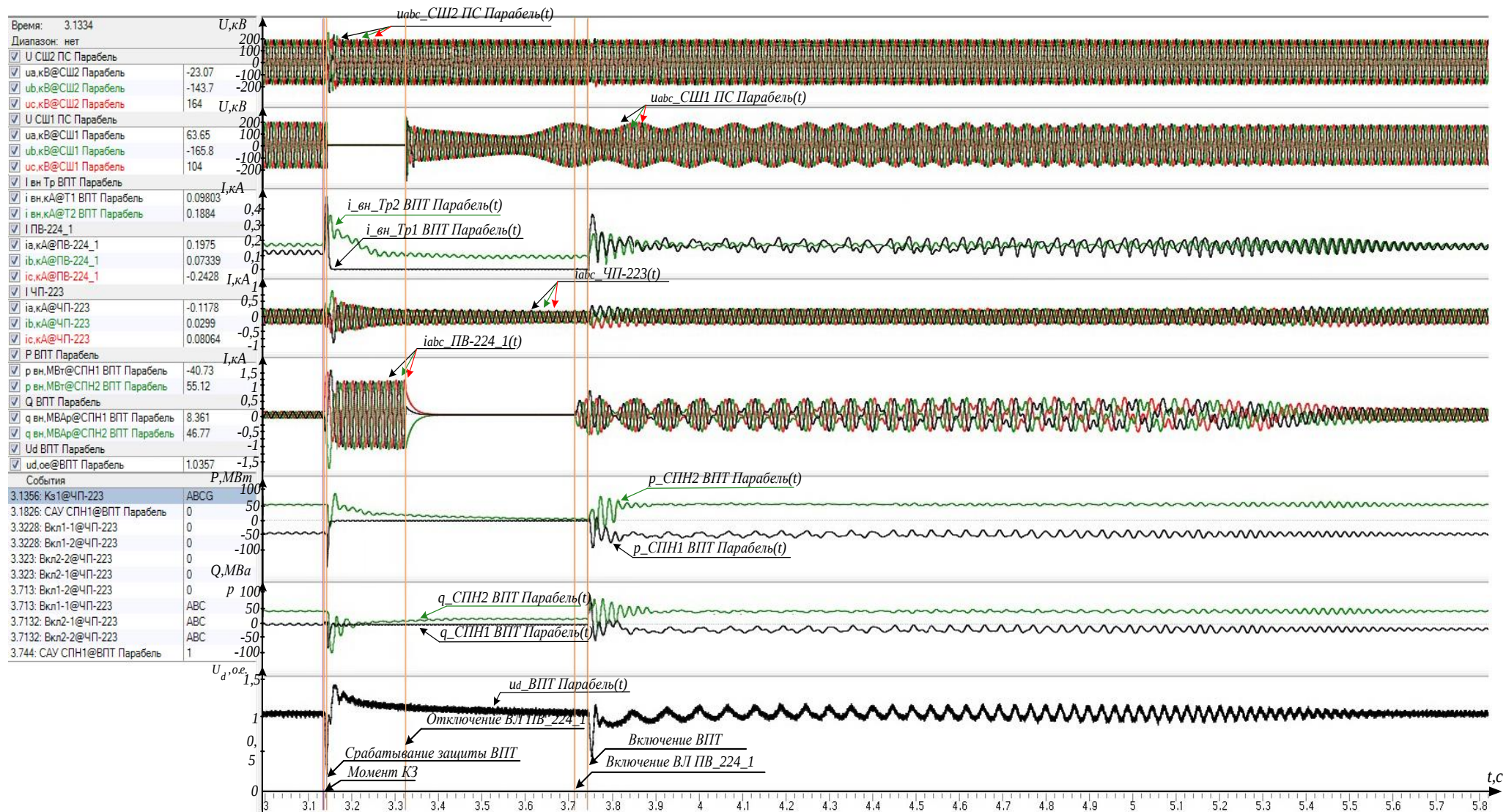


Рисунок 5.8 – Осциллограммы токов, напряжений и мощности при трехфазном КЗ на ВЛ ПВ_224_2 (ПС Каргасок – ПС Парабель) с ВПТ

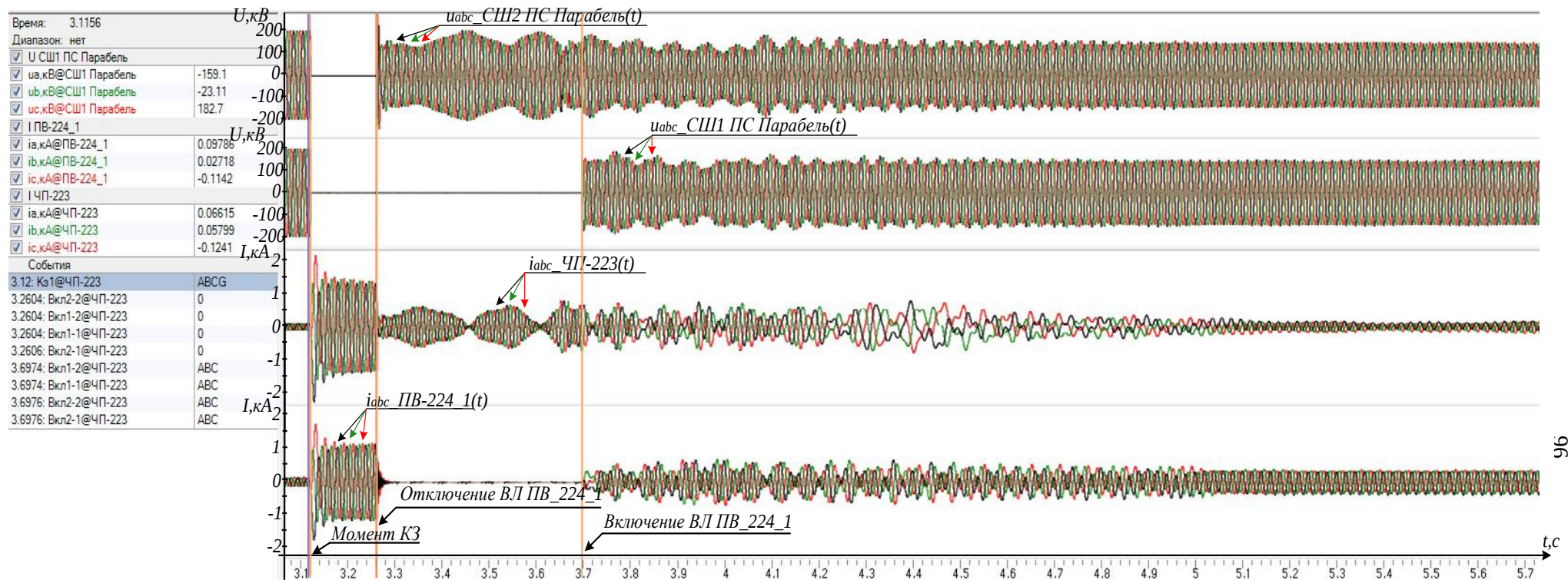
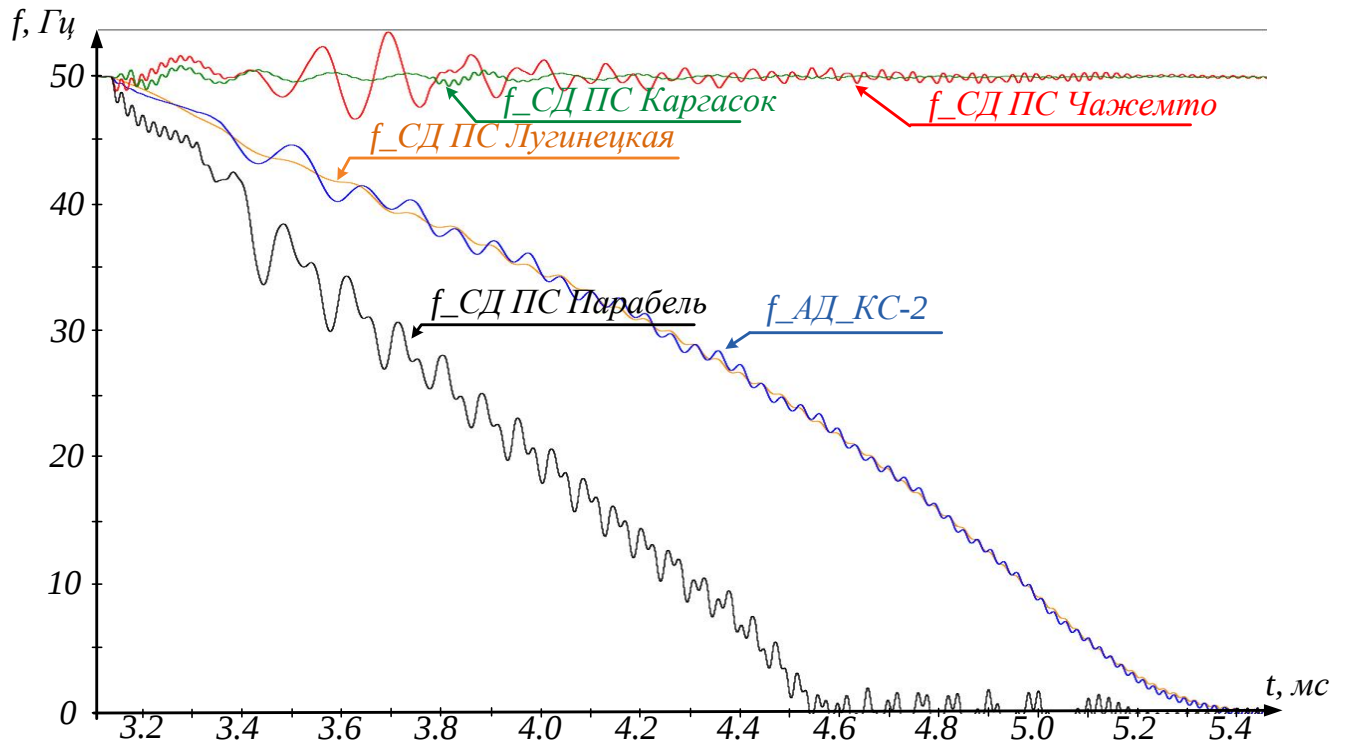
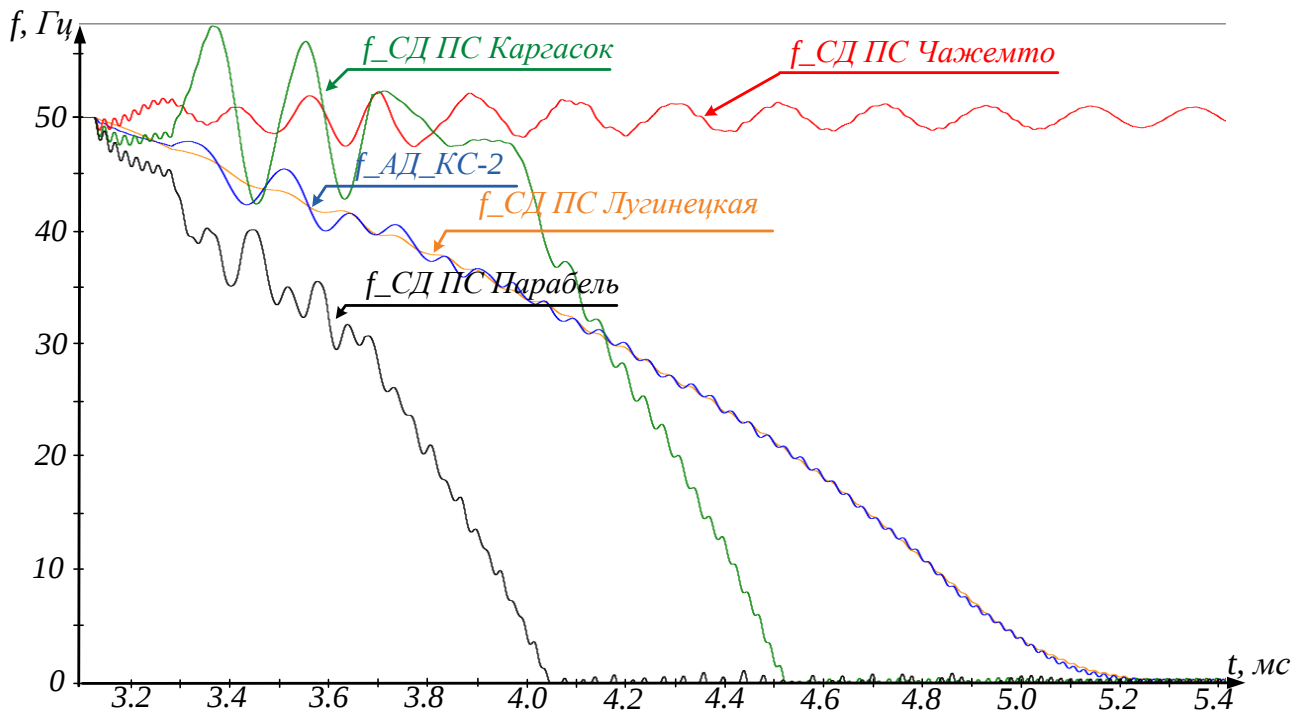


Рисунок 5.9 – Осциллограммы токов, напряжений и мощности при трехфазном КЗ на ВЛ ПВ_224_2 (ПС Каргасок – ПС Парабель) без ВПТ



а)



б)

Рисунок 5.10 – Осциллограммы изменения частот вращений синхронных и асинхронных двигателей при трехфазном КЗ на ВЛ ПВ_224_2 (ПС Каргасок – ПС Парабель) с ВПТ (а) и без ВПТ (б)

5.4. Выводы

1. Разработанный СГП ВПТ обеспечивает воспроизведение единого непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов в реальном времени и на неограниченном интервале времени в оборудовании и ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, а также автоматизированное и автоматическое управление, в том числе функциональное, их параметрами.

2. Проведённый комплекс исследований подтверждает адекватность созданного экспериментального средства всережимного моделирования функционирования ВПТ в ЭЭС и возможность его использования для надежного и эффективного решения широкого спектра задач анализа, проектирования и эксплуатации ЭЭС с ВПТ: объединения несинхронно работающих ЭЭС и их частей, независимого регулирования частоты и напряжения в каждой из них, снижения влияния и взаимовлияния КЗ, демпфирования колебаний и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной диссертационной работы получены теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные решения актуальных для мировой электроэнергетики задач:

1) выявлены и обоснованы причины существования проблемы всережимного адекватного моделирования функционирования ВПТ в ЭЭС, а также её принципиальная неразрешимость в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода;

2) предложен альтернативный существующему комплексный подход решения проблемы, в соответствии с которым разработана концепция всережимного адекватного моделирования функционирования ВПТ в ЭЭС;

3) разработаны структура и принципы построения средств осуществления концепции всережимного адекватного моделирования функционирования ВПТ в ЭЭС, образующих специализированный гибридный процессор (СГП);

4) создан экспериментальный образец СГП ВПТ, адаптированный для использования в средствах аналогичного моделирования реальных ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС);

5) выполнен комплекс исследований, подтвердивший свойства и возможности созданных средств всережимного адекватного моделирования функционирования ВПТ в ЭЭС, обеспечивающие бездекомпозиционное с гарантированной приемлемой точностью воспроизведение в реальном времени и на неограниченном интервале единого непрерывного спектра значимых квазиустановившихся и переходных процессов в ВПТ и реальных ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы;

6) созданы средства всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в реальных ЭЭС, обеспечивающие возможность получения достаточно полной и

достоверной информации, необходимой для надежного и эффективного решения сложных и важных задач проектирования, исследования, эксплуатации, развития и совершенствования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, связанных с объединением несинхронно работающих ЭЭС и их частей, передачей электроэнергии на постоянном токе, ограничением токов короткого замыкания в объединяемых ЭЭС и их частях, демпфированием низкочастотных колебаний в ЭЭС с ВПТ и обеспечением колебательной устойчивости функционирования таких ЭЭС, а также оценкой условий работы оборудования ВПТ и ЭЭС, включая устройства релейной защиты, автоматики и др.

Совокупность полученных теоретических, экспериментальных результатов и их научная, практическая значимость свидетельствуют о достижении целей диссертационной работы и её соответствии всем указанным во введении характеристикам.

Список литературы

1. Воропай, Н.И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы / Н.И. Воропай // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – V. 3(20). – С. 11–16.
2. Александров, Г.Н. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Г.Н. Александров, В.В. Ершевич, С.В. Крылов и др.; под ред. Г.Н. Александрова и Л.Л. Петерсона. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение. 1983. – 368с.
3. Шакарян, Ю.Г. Технологическая платформа Smart Grid (основные средства) / Ю.Г. Шакарян, Н.Л. Новиков // Энергоэксперт. – 2009. – № 4. – С. 42–49.
4. Кощеев, Л.А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети / Л.А. Кощеев, В.А. Шлайфштейн // Электрические станции. – 2005. – № 12. – С. 30–38.
5. Кочкин, В. И. Новые технологии повышения пропускной способности ЛЭП. Управляемая передача мощности / В.И. Кочкин // Новости Электротехники. – 2007. – Т. 46. – № 4. – С. 2–6.
6. Fang, X. BTB DC link modeling, control, and application in the segmentation of AC interconnections / X. Fang, J. H. Chow. // IEEE Power & Energy Society General Meeting. – Calgary, Canada, 2009. – P. 1–7.
7. Shu, W. Economic Assessment of HVDC Project in Deregulated Energy Markets / W. Shu, Z. Jinxiang, T. Lan, P. Jiuping // Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. – Nanjing, China, 2013. – P. 1–6.
8. Chiandone, M. Back-To-Back MVDC link for Distribution System Active Connection: a Network Study / M. Chiandone, G. Sulligoi, F. Milano, G. Piccoli, P. Mania // 3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications. – Milwaukee, USA, 2014. – P. 1–6.
9. L'Abbate, A. The role of facts and HVDC in the future paneuropean transmission system development / A. L'Abbate, G. Migliavacca, U. Häger, C. Rehtanz,

S.Rüberg, H. Ferreira, G. Fulli, A. Purvins // IEEE 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. – Great Britain, London, 2010. – P. 1–8.

10. Povh, D. Use of HVDC and FACTS / D. Povh // Proceedings of the IEEE. – 2000. – Vol. 88(2). – pp. 235–245.

11. Ying J.-H. Stability Enhancement and Blackout Prevention by VSC Based HVDC / J.-H. Ying, R. Palsson, M. Agren, T. Nordlander, P. Hjalmarsson, M. Manchen // Journal of Energy & Power Engineering. – 2012. – Vol. 6(11). – pp. 1891–1900.

12. Лозинова, Н.Г. Передача постоянного тока: Перспективы применения / Н.Г. Лозинова, М.И. Мазуров // Новости электротехники. – 2007. – № 4(46). – С. 1–6.

13. SC B4 HVDC and Power Electronics [Электронный ресурс]. — CIGR. Режим доступа: <http://b4.cigre.org/Publications/Other-Documents/Compendium-of-all-HVDC-projects> (дата обращения: 18.09.2017).

14. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2020 года: одобрена распоряжением Правительства РФ от 22 февраля 2008 г. № 215-р [Электронный ресурс]. URL: www.e-apbe.ru/scheme/ (дата обращения: 18.09.2017).

15. Padiyar, K.R. HVDC Power Transmission Systems – Technology and System Interactions / K.R. Padiyar // New Delhi: Wiley Eastern Limited. – 1990. – 291 pp.

16. Zhang, X.-P. Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control / X.-P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal // Berlin: Springer. – 2006. – 383 pp.

17. Imhof, M. Dynamic modeling of a VSC-HVDC converter / M. Imhof, G. Andersson // 48th International Universities' Power Engineering Conference. – Dublin, Ireland, 2014. – P. 1–6.

18. Tabatabaei, N.M. Damping function of back to back HVDC based Voltage Source Converter / N.M. Tabatabaei, N. Taheri, N.S. Boushehri // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2010. – Vol. 2(3). – pp. 82–87.

19. Kim, Ch.-K. HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems / Ch.-K. Kim, V.K. Sood, G.-S. Jang, S.-J. Lim, S.-J. Lee. – IEEE Press. – 2009. – 352 pp.

20. Zhang, L. Interconnection of Two Very Weak AC Systems by VSC-HVDC Links Using Power-Synchronization Control / L. Zhang, L. Harnefors, H.-P. Nee. // IEEE Transactions on Power Systems. – 2011. – Vol. 26 (1). – pp. 344–355.
21. Герасимов, А.С. Моделирование Вставки постоянного тока на преобразователях напряжения в среде ПБК «EUROSTAG» / А.С. Герасимов, Е.В. Ефимова, А.В. Коробков, В.А. Шлайфштейн // Известия НИИ постоянного тока. – 2010. – № 64. – С. 225–236.
22. Булыгин, М.А. Режимы работы передачи и вставок постоянного тока, выполненных на основе преобразователей напряжения / М.А. Булыгин, Т.А. Гущина, Г.В. Кирьенко, Л.А. Кощев, В.А. Шлайфштейн // Электрические станции. – 2004. – № 5. – С. 34–43.
23. Setreus, J. Introduction to HVDC Technology for Reliable Electrical Power Systems / J. Setreus, L. Bertling // Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. – Rincon, USA, 2008. – P. 1–8.
24. Sellick, R.L. Comparison of HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme / R.L. Sellick, M. Åkerberg // 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. – Birmingham, United Kingdom, 2012. – P. 1–6.
25. Lin, X.U. Hybrid electromechanical-electromagnetic simulation to SVC controller based on ADPSS platform / X.U. Lin, Y.H. Tang, P.U. Wei, Y. Han // Journal of Energy in South Africa. – 2014. – Vol. 25(4). – P. 112–122.
26. Negnevitsky, M. Development of an intelligent system for preventing large-scale emergencies in power systems / M. Negnevitsky, N. Voropai, V. Kurbatsky, N. Tomin, D. Panasetsky // IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), – Vancouver, Canada, – 2013. – pp. 1–5.
27. Nayak, O. Power electronics spark new simulation challenges / O. Nayak, S. Santoso, P. Buchanan // IEEE Computer Applications in Power. – 2012. – Vol. 15(4). – P. 37–44.
28. Kaijian, O. MMC-HVDC Simulation and Testing Based on Real-Time Digital Simulator and Physical Control System / Kaijian O., Hong R., Zexiang C.,

Haiping G. // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2014. – Vol. 2(4). – P. 1109–1116.

29. Stubbe, M. STAG - A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behaviour of Electrical Power Systems / M. Stubbe, A. Bihain, J. Deuse, J. C. Baader // IEEE Transactions on Power Systems. – 1989. – Vol. 4(1). – P. 129–138.

30. Chen, L. Hybrid Simulation of $\pm 500\text{kV}$ HVDC Power Transmission Project Based on Advanced Digital Power System Simulator / L. Chen, K.-J. Zhang, Y.-J. Xia, G. Hu // Journal of electronic science and technology. – 2013. – Vol. 11(1). – P. 66–71.

31. Qi, D. Defense schema against large disturbances in China Southern PowerGrid // Electra. – 2011. – Vol. 257. – P. 4–16.

32. Холл, Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / Дж. Холл, Дж. Уатт: пер. с англ.; под ред. А.Д. Горбунова. – М.: Мир, 1979. – 312 с.

33. Бородулин, М.Ю. Точность численного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в электрических цепях / Бородулин М.Ю., Дижур Д.П., Кадомский Д.Е. // Электричество. – 1988. – Vol. 6. – С. 46–51.

34. Бабушка, И. Численные процессы решения дифференциальных уравнений / И. Бабушка, Э. Витасек, М. Прагер: пер. с англ.; под ред. Г.И. Марчука. – М.: Мир, 1969. – 368 с.

35. Вержбицкий, В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). – М.: Высш. шк., 2001. – 382 с.

36. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов: Учебник для ВУЗов / Вержбицкий В.М. – М.: Высш. шк., 2002. – 840 с.

37. Хеминг, Р.В. Численные методы: Пер. с англ. / Р.В. Хеминг: под ред. Р.С. Гутера. – М: Наука, 1968. – 400 с.

38. Деккер, К. Устойчивость методов Рунге-Кутты для жестких нелинейных дифференциальных уравнений: пер. с англ. / К. Деккер, Я. Вервер. – Москва: Мир, 1988. – 332 с.

39. Хайпер, Э. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и алгебро-дифференциальные задачи: Пер. с англ. / Э. Хайпер, Г. Ваннер. – М.: Мир, 1999. – 612 с.
40. Ракитский, Ю.В. Численные методы решения жестких систем. / Ю.В. Ракитский, С.М. Устинов, И.Г. Черноруцкий. – М.: Наука, 1979. – 208 с.
41. Lambert, J. D. Computational methods in ordinary differential equations. / J. D. Lambert. – N. Y., 1973. London–New York–Sydney–Toronto, John Wiley and Sons, Ltd., XV. – 278 pp.
42. Dahlquist, G. Convergence and stability in the numerical integration of ordinary differential equations / G. Dahlquist // Math. Scand. – 1959. – Vol. 4. – P. 33–53.
43. Слободская, В.А. Краткий курс высшей математики. / В.А. Слободская. – М.: Высш. шк., 1969. – 544с.
44. Snider, L. Today's power system simulation challenge: High-performance, scalable, upgradable and affordable COTS-based real-time digital simulators / L. Snider, J. Bélanger, G. Nanjundaiah // 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India. – New Delhi, India, 2010. – P. 1–10.
45. Forsyth P.A. Testing Firing Pulse Controls for a VSC Based HVDC Scheme with a Real Time Timestep $< 3 \mu\text{s}$ / P.A Forsyth., T.L. Maguire, D. Shearer, D. Rydmell // International Conference on Power Systems Transients. – Kioto, Japonija, 2009. – P. 1–5.
46. Нудельман, Г.С. Применение технологий моделирования в развитии инновационных направлений электроэнергетики / Г.С. Нудельман, А.А. Наволочный, О.А. Онисова // Релейщик. – 2014. – Vol. 2(18). – P. 16–19.
47. Yang, B.-M. Verification of hybrid real time HVDC simulator in Cheju-Haenam HVDC systems / B.-M. Yang, C.-K. Kim, G.-J. Jung, Y.-H. Moon // J. Electr. Eng. Technol. – 2006. – Vol. 1. – P. 23–27.
48. Liu, Z.H. Modeling and simulation research of large-scale AC/DC hybrid power grid based on ADPSS / Z.H. Liu, Y. Wang, J.M. Chen, Y.R. Guo, X.G. Wang,

Z.Q. LI, D.X. Du, X. Li // 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). – Kowloon, Hong Kong, 2014. – P.1–6.

49. Zhang, Y. Development and Analysis of Applicability of a Hybrid Transient Simulation Platform Combining TSA and EMT Elements / Y. Zhang, A.M. Gole, W. Wu, B. Zhang, H. Sun // IEEE Transaction on power system. – 2013. – Vol. 5(1). – P. 357–366.

50. Аюев, Б.И. Верификация цифровых моделей ЕЭС/ОЭС / Б.И. Аюев, А.С. Герасимов, А.Х. Есипович, Ю.А. Куликов // Электричество. – 2008. – Vol. 5. – С. 2–7.

51. Cole, S. Robust Modeling Against Model-Solver Interactions for High-Fidelity Simulation of VSC HVDC Systems in EUROSTAG / S. Cole, B. Haut // IEEE Transactions on power systems. – 2013. – Vol. 28(3). – pp. 2635–2638.

52. Tian, F. Developing trend of power system simulation and analysis technology / F. Tian, Y. H. Huang, D. Y. Shi, T. Xia, W. J. Qiu, X. B. Hu, Y. L. Li, Y. Tang, X. X. Zhou // Proceedings of the CSEE. – 2014. – Vol. 34(13). – pp. 2151–2163.

53. Zhu, Y. General situation of power system hybrid simulation center / Y. Zhu, W. Jiang, and Y. Yin // Power System Technology. – 2008. – Vol. 32(22). – pp. 35–38.

54. Tian, F. Advanced digital power system simulator / F. Tian, Y. L. Li, X. X. Zhou, Z. X. Wu // Power System Technology. – 2008. – Vol. 32(22). – pp. 17–22.

55. Hauer, J.F. Dynamic Performance Validation in the Western Power System / J.F. Hauer, M.J. Beshir, W.A. Mittelstadt // APEx 2000 Conference. – Kananaskis, Alberta, 2000. – P. 1–8.

56. Kosterev, D. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage / D. Kosterev D. Kosterev, C. Taylor, W. Mittelstadt // IEEE Transactions on Power Systems. – 1999. – Vol. 14(3). – P. 1–8.

57. Hybrid Systems: Computation and Control. URL: <http://www.hscconference.org/> (дата обращения: 20.09.2017).

58. Погосян, Т.А. Погрешность расчетов электромеханических переходных процессов в электрических системах / Т.А. Погосян // Электричество. – 1984. – № 3. – С. 54–56.
59. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников – М.: Высш. шк. – 1985. – 536 с.
60. Гуревич Ю.Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А.А. Окин – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 390 с.
61. Standard models library. Eurostag package: User guide. Release 4.4.2008. – 250 pp.
62. Deuse, J. Modeling of FACTS for Power System Analysis / J. Deuse, M. Stubbe, B. Meyer, P. Panciatici // CIGRE Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems. – Tokyo, 1995. – P. 1–6.
63. Герасимов А.С. Об опыте верификации цифровых и физических моделей энергосистем / А.С. Герасимов, А.Х. Есипович, А.Н. Смирнов // Электрические станции. – 2010. – №11. – С. 11–19.
64. Аюев, Б.И. Базовая динамическая модель ЕЭС/ОЭС и ее верификация по данным СМПП / Б.И. Аюев, Герасимов А.С., Дьячков В.А., Есипович А.Х., Жуков А.В., Кузьмин С.Е., Куликов Ю.А., Левандовский А.В., Смирнов А.Н. // Мониторинг параметров электроэнергетической системы: Сб. докладов II международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 1–8.
65. Герасимов, А.С. Верификация динамической модели ЕЭС/ОЭС по данным систем мониторинга переходных режимов / А.С. Герасимов, А.Х. Есипович, С.Е. Кузьмин, Ю.А. Куликов, А.Н. Смирнов, А.И. Суковицын // Современные системы возбуждения вращающихся электрических машин и устойчивость электроэнергетических систем: материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 60–66.

66. Воропай, Н.И. Управление мощными энергообъединениями / Н.И. Воропай, В.В. Ершевич, Я.Н. Лугинский и др. Под ред. Совалова С.А. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 255 с.
67. Kjolle, G.H. Protection system faults 1999 – 2003 and the influence on the reliability of supply / G.H. Kjolle, J. Heggset, B.T. Hjartsjo, H. Engen // 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech. – St. Petersburg, Russia. 2005. – P. 1–6.
68. Davies, M. HVDC PLUS – Basics and Principle of Operation [Электронный ресурс] / M. Davies, M. Dommaschk, J. Dorn, J. Lang, D. Retzmann, D. Soerangr. – URL: http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/powertransmission/HVDC/HVDC_Plus_Basics_and_Principle.pdf. (дата обращения 20.09.2017).
69. Bahrman, M.P. Overview of HVDC transmission / M.P. Bahrman // Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta, USA, 2008. – P. 1–7.
70. Thepparat, P. Smart Transmission System by HVDC and FACTS / Retzmann D., Ogée E., Wiesinger M. / P. Thepparat, D. Retzmann, E. Ogée, M. Wiesinger // IEEE Towards carbon free society through smarter grids. – Grenoble, France, 2013. – P. 1–6.
71. Asplund, G. Application of HVDC Light to power system enhancement / G. Asplund // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. – 2000. – Vol. 4. – P. 2498–2503.
72. Reed G. Advantages of voltage sourced converter (VSC) based design concepts for FACTS and HVDC-link applications / G. Reed, R. Pape, M. Takeda // Presented at Power Engineering Society General. – Toronto, Canada. 2003. – pp. 1816–1821.
73. Melvold, D.J. Back-to-back HVDC system performance with different smoothing reactors / D.J. Melvold, W.F Long // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1989. – Vol. 4(1). – pp. 208– 215.
74. Andersen, B. R. VSC Transmission Tutorial [Электронный ресурс] / B. R. Andersen. // Andersen Power Electronic Solutions Ltd. – URL:

<http://www.andersenpes.talktalk.net/VSC%20Transmission%20Tutorial%20paper.pdf>
(дата обращения: 20.09.2017).

75. Flourentzou, N., VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview / N. Flourentzou, V. G. Agelidis, G. D. Demetriades // IEEE Transactions on power electronics. – 2009. – Vol. 24(3). – pp. 592–602.

76. Rocha, V.A. A New Fault-Tolerant Realization of the Active Three-Level NPC Converter / V.A. Rocha, S.M. Silva, I.A. Pires, A.A. Machado, F.V. Amaral, V.N. Ferreira, H. Paula, B.J. Cardoso Filho // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – Pittsburgh, USA, 2014. – pp. 3483–3490.

77. Уфа, Р.А. Проблема адекватного моделирования функционирования вставок постоянного тока в электроэнергетических системах и средства её решения (часть 1) / Р.А. Уфа, А.С. Гусев, А.С. Васильев, А.О. Сулайманов, А.А. Суворов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2017. – № 5. – С 32–46.

78. Уфа, Р.А. Разработка гибридных моделей высоковольтных передач постоянного тока для задач всережимного анализа больших энергосистем / Р.А. Уфа, А.В. Прохоров, А.С. Васильев, Н.Ю. Рубан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2014. – Т. 324. № 4. – С. 123–133.

79. Уфа, Р.А. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса / Р.А. Уфа, М.В. Андреев, Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, А.А. Суворов, Н.Ю. Рубан // Газовая промышленность. – 2017. – № 5(752). – С. 18–27.

80. Ufa, R.A. A hybrid simulation model for VSC HVDC / R.A. Ufa, Y.S. Borovikov, A.S. Gusev, A.O. Sulaymanov, A.S. Vasilev, M.V. Andreev, N.Y. Ruban, A.A. Suvorov // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2016. – Vol. 7(5). – pp. 2242–2249.

81. Уфа, Р.А. Гибридная модель вставки постоянного тока / Р.А. Уфа, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, А.С. Васильев, Н.Г. Лозинова, О.В. Сулова // Энергия единой сети. – 2016. – № 2(25). – С. 52–61.

82. Тимонтеев, В.Н. Аналоговые перемножители сигналов в радиоэлектронной аппаратуре / В.Н. Тимонтеев, Л.М. Величко, В.А. Ткаченко – М.: Радио и связь. – 1982. – 112 с.
83. Low-Voltage, Quad, SPST CMOS Analog Switches MAX4610/MAX4611/MAX4612 / Maxim Datasheet Doc. No. 19-4793. – pp.1–11.
84. Dufour, C. InfiniBand-Based Real-Time Simulation of HVDC, STATCOM and SVC Devices with Custom-Of-The-Shelf PCs and FPGAs / C. Dufour, S. Abourida, J. Bélanger // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2006. – Vol. 3. – P. 2025–2029.
85. AT91SAM7X256 // Microchip Corporate Headquarters. – URL: <http://www.atmel.com/ru/ru/devices/AT91SAM7X256.aspx> (дата обращения: 20.09.2017).
86. Дроздов, А.Д. Автоматизация энергетических систем: учеб пособие для электроэнерг. специальностей вузов / А.Д. Дроздов, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, М.М. Савин. – М.: Энергия. – 1977. – 441 с.
87. Алексеев, О.П. Автоматика электроэнергетических систем / О.П. Алексеев, В.Е. Казанский, В.Л. Козис и др.; Под ред. В.Л. Козиса и Н.И. Овчаренко – М.: Энергоиздат. – 1981. – 479 с.
88. Лебедев Н.В. Измерение угла расхождения векторов напряже-ния Томской и Тюменской энергосистем / Н.В. Лебедев, В.В. Литвак, Г.З. Маркман // Сборник «Процессы и режимы электрических систем», Томск: – 1990. – С. 55–59.
89. Волошин, М. В. Разработка алгоритмов управления ВПТ от централизованной системы автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности / М.В. Волошин, А.А. Демидов, К.А. Никишин, Н.А. Титаевская // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2015. – Vol. 1(72). – pp. 95–108.
90. Drozdov, A. Current status and development VSC-based HVDC technologies in power system of Russian Federation / A.Drozдов A.Kiselev O.Suslova // HVDC and Power Electronics International Colloquium. – Agra, India, 2015. – P. 1–9.

91. Khatir, M. Dynamic performance of a back-to-back HVDC station based on voltage source converters / M. Khatir, S.-A. Zidi, S. Hadjeri, M.-Karim Fellah // Journal of Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 61(1). – pp.29–36.
92. Petersson, A. Dynamic performance of the Eagle Pass back-to-back HVDC Light tie / A. Petersson, A. Edris. // Presented at Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission. – London, UK, 2001. – pp.220–225.
93. Тетельбаум, И.М. Практика аналогового моделирования динамических систем: Справочное пособие / И.М. Тетельбаум, Ю.Р. Шнейдер – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – 384 с.
94. Max, L. Energy Evaluation for DC/DC Converters in DC-Based Wind Farms / L. Max // Licentiate Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden. 2007. – P. 1–151.
95. Andreas, A.A. A novel test method for minimising energy costs in IGBT power cycling studies / A.A. Andreas // Ph.D. dissertation Univ. Witwatersrand, Johannesburg, South Africa. 2006. – P. 1–207.
96. ABB StakPak H Series Press-pack IGBT5SLF 20H2500 / Datasheet Doc. No. 5SYA1584-02. – pp.1–9.

АКТ

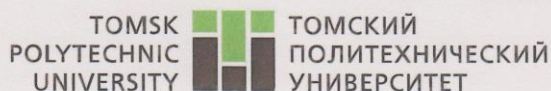
об использовании результатов диссертационной работы
«Программно-технические средства всережимного моделирования в реальном
времени вставок постоянного тока в электроэнергетических системах»
Уфа Руслана Александровича

Результаты данной диссертационной работы необходимы для обоснованного
выбора средств объединения раздельно работающих электроэнергетических систем
(ЭЭС) и их частей, в частности Томской ЭЭС, а также оценки режимных условий
этого объединения.

Зам. генерального директора
ОАО «Томские магистральные сети»



Карманов Ю.А.



Ministry of Education and Science of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"National Research Tomsk Polytechnic University" (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel. (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,
Fax (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):
02069303,
Company Number: 1027000890168,
VAT / KPP (Code of Reason for Registration)
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.: (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,
факс: (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

№ _____
на № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательной
деятельности
ФЕАОВ НИ ТПУ
Боровиков Ю.С.
2017 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
«Программно-технические средства всережимного моделирования в реальном
времени вставок постоянного тока в электроэнергетических системах»
Уфа Руслана Александровича

Настоящим актом подтверждается использование в учебном процессе и научно-исследовательской работе кафедры «Электроэнергетические системы» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета результатов данной диссертационной работы. Теоретические материалы диссертации используются при чтении лекций по дисциплине «Автоматика энергосистем», а разработанный экспериментальный образец средств всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования вставок постоянного тока в реальных электроэнергетических системах используется при проведении лабораторных и практических занятий.

Зав. каф. ЭЭС ЭНИН

Сулайманов А.О.

Приложение Б. Определения масштабных коэффициентов структурных схем ГСП и параметров ЦУАК ЦУ ФМ СПН и ЦУ ФМ ППК

В таблицах Б.1–3 представлен расчет определения масштабных коэффициентов с учетом максимальных значений шкалы интегральных микросхем ГСП ($U_{\max}^{\text{модельн}} = \pm 10 \text{ В}$, $I_{\max}^{\text{модельн}} = \pm 5 \text{ мА}$) и максимальных кратностей изменения воспроизводимых переменных (K_{KU} – кратность напряжения, K_{KI} – кратность тока), необходимых для определения коэффициентов передач функциональных звеньев этих схем и параметров ЦУАК ЦУ ФМ СПН и ЦУ ФМ ППК.

В таблице Б.2 приведен фрагмент расчета коэффициентов передачи функциональных элементов компьютерной модели структурных схем ГСП и масштабных коэффициентов согласно методике их определения [93].

Таблица Б.1. Расчет масштабных коэффициентов

$S_{\phi} = 200 \text{ МВА}$	$U_{\phi 1} = U_{\text{ном1}} = 220 \text{ кВ}$ $I_{\phi 1} = I_{\text{ном1}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\phi 1}} = 0,525 \text{ кА}$	$U_{\phi 2} = U_{\text{ном2}} = 35 \text{ кВ}$ $I_{\phi 2} = I_{\text{ном2}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\phi 2}} = 3,299 \text{ кА}$
Масштабный коэффициент по напряжению: $M_U^m = \frac{U_{\max}^{\text{модельн}}}{K_{KU} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \sqrt{2}}, \frac{\text{В}}{\text{кВ}}$	0,028	0,175
Масштабный коэффициент по току: $M_I^m = \frac{U_{\max}^{\text{модельн}}}{K_{KI} \cdot I_{\text{ном}} \cdot \sqrt{2}}, \frac{\text{В}}{\text{кА}}$	1,347	0,214

Таблица Б.1. Продолжение

Масштабный коэффициент по сопротивлению: $M_z^m = \frac{M_I^m}{M_U^m}, Ом$	46,8	1,225
---	------	-------

Таблица Б.2. Коэффициенты передач элементов компьютерных моделей структурных схем ГСП

ГСП цепи постоянного тока		
Коэффициент уравнения 3.1	$k_{yp1} = \frac{1}{R_{j1C}}$	реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (А3 на рисунке 4.1): $\frac{R_{2A3}}{R_{1A3}} = k_{yp1} \cdot \frac{M_{вых}}{M_{вх}} = 555,4 \cdot \frac{1,5}{730,7} = 1,15$ где $M_{вых}$ и $M_{вх}$ – соответственно масштабные коэффициенты выходного и входного напряжения усилителя.
Коэффициент уравнения 3.1	$k_{yp2} = \frac{1}{C_{j1}}$	реализован посредством интегратора (А4 на рисунке 4.1): $R_{1A4} \cdot C_{A4} = \frac{M_{вх} \cdot M_t}{M_{вых} \cdot k_{yp2}} = \frac{1,52 \cdot 1}{10 \cdot 0,19} = 0,77$ где $M_t = \frac{t}{t_n} = 1$ – масштаб времени, определяемый отношением реального (t_n) и машинного (t) времени.
Коэффициент уравнения 3.1	$k_{yp3} = \frac{1}{L_j}$	реализован посредством интегратора (А8 на рисунке 4.1): $R_{1A8} \cdot C_{A8} = \frac{M_{вх} \cdot M_t}{M_{вых} \cdot k_{yp3}} = \frac{10 \cdot 1}{1,17 \cdot 45,9} = 0,18$

Таблица Б.2. Продолжение

Коэффициент уравнения 3.1 $k_{yp4} = R_{jL}$ реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (А9 на рисунке 4.1):		
$\frac{R_{2A9}}{R_{1A9}} = k_{yp4} \cdot \frac{M_{\text{блх}}}{M_{\text{ex}}} = 0,00068 \cdot \frac{1478}{1,16} = 0,86$		
ГСП трансформатора связи		
Коэффициент уравнения 3.3 $k_{yp5} = \frac{1}{L_{A1}}$ реализован посредством интегратора (А5 на рисунке 4.10):		
$R_{1A5} \cdot C_{A5} = \frac{M_{\text{ex}} \cdot M_t}{M_{\text{блх}} \cdot k_{yp5}} = \frac{1,25 \cdot 1}{8,66 \cdot 13,33} = 1,92$		
Коэффициент уравнения 3.3 $k_{yp6} = R_{jA1}$ реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (А6 на рисунке 4.10):		
$\frac{R_{2A6}}{R_{1A6}} = k_{yp6} \cdot \frac{M_{\text{блх}}}{M_{\text{ex}}} = 0,002 \cdot \frac{527,86}{1,25} = 0,86$		
Коэффициент уравнения 3.3 $k_{yp8} = W_{A1}$ реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (А10 на рисунке 4.10):		
$\frac{R_{2A10}}{R_{1A10}} = k_{yp8} \cdot \frac{M_{\text{блх}}}{M_{\text{ex}}} = 456 \cdot \frac{8,66}{62,5} = 63,18$		
Коэффициент уравнения 3.3 $k_{yp7} = W_{A2}$ реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (А8 на рисунке 4.10):		
$\frac{R_{2A8}}{R_{1A8}} = k_{yp7} \cdot \frac{M_{\text{блх}}}{M_{\text{ex}}} = 80 \cdot \frac{49,48}{62,5} = 63,3$		
Коэффициент уравнения 3.3 $k_{yp9} = \frac{1}{k}$ реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (А11 на рисунке 4.10):		
$\frac{R_{2A11}}{R_{1A11}} = k_{yp9} \cdot \frac{M_{\text{блх}}}{M_{\text{ex}}} = 0,175 \cdot \frac{1,25}{0,21} = 1$		

Таблица Б.2. Продолжение

Коэффициент уравнения 3.3 $k_{yp10} = \frac{1}{L_{A2}}$ реализован посредством интегратора (A18 на рисунке 4.10): $R_{1A18} \cdot C_{A18} = \frac{M_{ex} \cdot M_t}{M_{ex} \cdot k_{yp10}} = \frac{1,25 \cdot 1}{8,66 \cdot 13,33} = 1,92$
Коэффициент уравнения 3.3 $k_{yp11} = R_{jA2}$ реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (A22 на рисунке 4.10): $\frac{R_{2A22}}{R_{1A22}} = k_{yp11} \cdot \frac{M_{ex}}{M_{ex}} = 0,002 \cdot \frac{527,86}{1,25} = 0,86$
ГСП фильтра высших гармоник
Коэффициент уравнения 3.5 $k_{yp12} = \frac{1}{R_j}$ реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (A3 на рисунке 4.15): $\frac{R_{2A3}}{R_{1A3}} = k_{yp12} \cdot \frac{M_{ex}}{M_{ex}} = 0,16 \cdot \frac{7,49}{1,02} = 1,15$
Коэффициент уравнения 3.5 $k_{yp13} = \frac{1}{C_j}$ реализован посредством интегратора (A6 на рисунке 4.15): $R_{1A6} \cdot C_{A6} = \frac{M_{ex} \cdot M_t}{M_{ex} \cdot k_{yp13}} = \frac{7,49 \cdot 1}{8,66 \cdot 7,48} = 0,11$
Коэффициент уравнения 3.5 $k_{yp14} = \frac{1}{L_j}$ реализован посредством интегратора (A9 на рисунке 4.15): $R_{1A8} \cdot C_{A8} = \frac{M_{ex} \cdot M_t}{M_{ex} \cdot k_{yp14}} = \frac{8,66 \cdot 1}{7,49 \cdot 58,97} = 0,019$
Коэффициент уравнения 3.5 $k_{yp15} = R_{jL}$ реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (A10 на рисунке 4.15): $\frac{R_{2A10}}{R_{1A10}} = k_{yp15} \cdot \frac{M_{ex}}{M_{ex}} = 0,0021 \cdot \frac{3007,8}{7,49} = 0,86$

Таблица Б.2. Продолжение

Коэффициент уравнения 3.5 $k_{yp16} = R_{jC}$ реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (А11 на рисунке 4.15):			
$\frac{R_{2A11}}{R_{1A11}} = k_{yp16} \cdot \frac{M_{блх}}{M_{вх}} = 0,0002 \cdot \frac{3007,8}{7,49} = 0,86$			
ГСП фазного реактора			
Коэффициент уравнения 3.6 $k_{yp17} = \frac{1}{L_j}$ реализован посредством интегратора (А3 на рисунке 4.17):			
$R_{1A3} \cdot C_{A3} = \frac{M_{вх} \cdot M_t}{M_{блх} \cdot k_{yp17}} = \frac{8,66 \cdot 1}{1 \cdot 7,48} = 1,15$			
Коэффициент уравнения 3.6 $k_{yp18} = R_j$ реализован с помощью инвертирующего масштабирующего усилителя (А4 на рисунке 4.17):			
$\frac{R_{2A4}}{R_{1A4}} = k_{yp18} \cdot \frac{M_{блх}}{M_{вх}} = 0,0016 \cdot \frac{534,8}{1} = 0,86$			

Для определения параметров ЦУАК ЦУ ФМ СПН и ЦУ ФМ ППК с учетом параметров моделируемого оборудования необходимо определить машинный коэффициент для сопротивлений:

$$M_Z = \frac{Z_{ном}^{модельн}}{Z_{ном}},$$

где $Z_{ном} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}}$ - номинальное сопротивление; машинное номинальное

сопротивление $Z_{ном}^{модельн} = \frac{U_{ном}^{модельн}}{I_{ном}^{модельн}} = \frac{U_{мах}^{модельн} / K_{KU}}{I_{мах}^{модельн} / K_{KI}} = \frac{10/2}{5/10} = 10 \text{ кОм}.$

Таблица Б.3. Расчет параметров ЦУАК ЦУ ФМ СПН и ЦУ ФМ ППК

ЦУАК ЦУ ФМ СПН
Согласно техническому паспорту транзистора типа 5SNR 20H2500 [94– 96], используемого, в частности, в СПН ВПТ на ПС Могоча, и с учетом параметров демпфирующей цепи (рисунок 3.8): 1) прямое сопротивление силового транзистора (СТ) и обратного диода (Д): • $R_{пр\ CT} = 0,063\ Ом;$ • $R_{пр\ Д} = 0,001\ Ом;$ 2) обратное сопротивление: • $R_{обр\ CT} = 5 \cdot 10^3\ Ом;$ • $R_{обр\ Д} = 50 \cdot 10^3\ Ом;$ 3) эквивалентная емкость: • $C_{CT} = 0,33 \cdot 10^{-6} (C_{CT});$ • $C_{Д} = 1 \cdot 10^{-6};$ 4) параметры демпфирующей цепи для 5SNR 20H2500: • $C_{дем.ц.} = 1 \cdot 10^{-6}\ Ф ;$ • $R_{дем.ц.} = 1\ Ом ;$ определены машинные коэффициенты для параметров ЦУАК: $M_Z = \frac{Z_{ном\ модельн}}{Z_{ном}} = \frac{10 \cdot 10^3}{1,25} = 8 \cdot 10^3, \text{ где } Z_{ном} = \frac{U_{ном_СТ}}{I_{ном_СТ}} = \frac{2500}{2000} = 1,25\ Ом ;$ 1) прямое сопротивление: • $R'_{пр\ CT} = R_{пр\ CT} \cdot M_Z = 0,063 \cdot 8 \cdot 10^3 = 504\ Ом ;$ • $R'_{пр\ Д} = R_{пр\ Д} \cdot M_Z = 0,01 \cdot 8 \cdot 10^3 = 80\ Ом ;$ 2) обратное сопротивление: • $R'_{обр\ CT} = R_{обр\ CT} \cdot M_Z = 5 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^3 = 40 \cdot 10^6\ Ом ;$ • $R'_{обр\ Д} = R_{обр\ Д} \cdot M_Z = 50 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^3 = 400 \cdot 10^6\ Ом ;$

3) эквивалентная емкость:

- $C_{CT}^* = C_{CT} \cdot \frac{1}{M_Z} = 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3} = 40 \cdot 10^{-12} \Phi;$
- $C_{CT}^* = C_{CT} \cdot \frac{1}{M_Z} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3} = 125 \cdot 10^{-12} \Phi;$

4) параметры демпфирующей цепи:

- $C_{дем.ц.}^* = C_{дем.ц.} \cdot \frac{1}{M_Z} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3} = 125 \cdot 10^{-12} \Phi;$
- $R_{дем.ц.}^* = R_{дем.ц.} \cdot M_Z = 1 \cdot 8 \cdot 10^3 = 8 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$

ЦУАК ЦУ ФМ ППК

Согласно паспортным техническим данным и статистике анализа различных КЗ диапазон сопротивлений шунтов выключателей ($R_{ш}$) и переходных сопротивлений короткого замыкания ($R_{п}$) (рисунок 3.10) составляет (1–100) Ом:

1) для класса напряжения 220 кВ:

- $R_{ш}^* = R_{ш} \cdot M_Z = R_{ш} \cdot \frac{Z_{ном}^{модельн}}{Z_{ном}} = (1-100) \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{242} = (8 \cdot 10^3 \dots 80 \cdot 10^3) \text{ Ом};$
- $R_{п}^* = R_{п} \cdot M_Z = R_{п} \cdot \frac{Z_{ном}^{модельн}}{Z_{ном}} = (1-100) \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{242} = (8 \cdot 10^3 \dots 800 \cdot 10^3) \text{ Ом};$

2) для класса напряжения 35 кВ:

- $R_{ш}^* = R_{ш} \cdot M_Z = R_{ш} \cdot \frac{Z_{ном}^{модельн}}{Z_{ном}} = (1-100) \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{6,125} = (1,633 \cdot 10^3 \dots 16,33 \cdot 10^3) \text{ Ом};$
- $R_{п}^* = R_{п} \cdot M_Z = R_{п} \cdot \frac{Z_{ном}^{модельн}}{Z_{ном}} = (1-100) \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{242} = (8 \cdot 10^3 \dots 80 \cdot 10^3) \text{ Ом}.$