

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

Зарва Денис Борисович

**ТЕХНИЧЕСКОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ
ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ТОКАМАКА КТМ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (промышленность, научные исследования)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

канд. техн. наук, доцент

Павлов Вадим Михайлович

Томск – 2021

Оглавление

Введение	6
Глава 1. Анализ объекта управления и проблем создания системы импульсного электропитания токамака КТМ.....	20
1.1. Исследование характеристик электромагнитной системы установки КТМ, определение требований, предъявляемых к системе импульсного электропитания	22
1.2. Исследование схмотехнических и алгоритмических решений при создании систем импульсного электропитания и их систем управления для установок типа токамак	25
1.2.1. Способы подключения к источнику электроэнергии	26
1.2.2. Схемы построения источников электропитания в зависимости от их целевого назначения	28
1.2.3. Схмотехника и типы применяемых преобразователей	37
1.2.4. Коммутационное оборудование, используемое в источниках импульсного электропитания.....	41
1.2.5. Системы и алгоритмы управления, способы оперативной диагностики и противоаварийной защиты источников электропитания	44
1.3 Выводы по главе.....	55
Глава 2. Разработка и оптимизация для целей управления и диагностики системы импульсного электропитания токамака КТМ. Подготовка исходных данных для аналитического компьютерного моделирования	58
2.1. Формулировка общих требований к системе импульсного электропитания токамака КТМ.....	58
2.2. Описание структуры системы электропитания комплекса КТМ.....	60
2.3. Разработка специализированного (нестандартного) электрооборудования, узлов и комплектующих. Оптимизация оборудования для целей управления и диагностики	62

2.4 Подготовка исходных данных для реализации аналитической модели электротехнического комплекса КТМ в среде Simulink/Simscape системы Matlab	72
2.4.1 Расчет параметров точки подключения, ВЛЭП 220 кВ, шинных мостов, шинопроводов и кабельных линий	73
2.4.2 Расчет параметров трансформаторов и уравнивающих реакторов	78
2.4.3 Оптимизация схем замещения и расчет параметров преобразовательного оборудования	84
2.5 Выводы по главе	87
Глава 3. Моделирование системы импульсного электропитания токамака КТМ в среде Simulink/Simscape совместно с её системой цифрового управления. Определение режимов работы электротехнического оборудования. Разработка и верификация алгоритмов управления и диагностики	90
3.1 Описание системы цифрового управления источниками импульсного электропитания токамака КТМ	90
3.2 Математическое описание алгоритмов диагностики электротехнического оборудования КТМ	93
3.3 Алгоритм импульсно-фазового управления источниками питания токамака КТМ	94
3.4 Разработка алгоритма управления источником питания обмотки центрального соленоида, совместно с ключом-прерывателем постоянного тока	96
3.5 Исследование статических и динамических характеристик источников импульсного электропитания	103
3.6 Реализация контура автоматического управления напряжением на обмотках электромагнитной системы токамака КТМ	107
3.6.1 Синтез цифрового регулятора напряжения	110
3.7 Моделирование системы импульсного электропитания совместно с её системой цифрового управления	113

3.7.1 Настройка и верификация параметров контура управления средневыпрямленным напряжением.....	114
3.7.2 Моделирование и расчет внешних характеристик, определение границ режимов работы источников импульсного электропитания.....	123
3.8 Реализация комплексной аналитической модели системы электропитания токамака КТМ. Верификация модели и алгоритмов управления.....	126
3.9 Выводы по главе.....	128
Глава 4. Разработка и верификация противоаварийных алгоритмов и алгоритмов по приведению системы электропитания комплекса КТМ в безопасное состояние	131
4.1 Анализ системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ и её компонентов	131
4.2 Анализ возможных аварийных ситуаций, алгоритмизация комплекса противоаварийных мер.....	134
4.3 Формализация алгоритма противоаварийного управления и разработка модели соответствующей дискретно-событийной системы	137
4.4 Разработка и исследование имитационной модели системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ с использованием математического аппарата сети Петри	148
4.5 Верификация модели и внедрение алгоритмов противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ	161
4.6 Выводы по главе.....	165
Заключение.....	167
Список сокращений и условных обозначений.....	170
Список литературы.....	174
Приложение А. Анализ исходных данных и проблем создания системы импульсного электропитания токамака КТМ	185
Приложение Б. Разработка и оптимизация для целей управления и диагностики системы импульсного электропитания токамака КТМ. Подготовка исходных данных для аналитического компьютерного моделирования	189

Приложение В. Моделирование системы импульсного электропитания в среде Simulink/Simscape. Определение режимов работы электротехнического оборудования. Разработка и верификация алгоритмов управления и диагностики	192
Приложение Г. Разработка и верификация противоаварийных алгоритмов и алгоритмов по приведению системы электропитания установки КТМ в безопасное состояние.....	197
Приложение Д. Копии актов внедрения, свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, протокол физического пуска установки КТМ.....	204

Введение

Общая характеристика работы. На пути создания первого промышленного реактора, работающего на основе реакции управляемого термоядерного синтеза мировое научное сообщество столкнулось с рядом существенных задач, как научного, так и инженерно-технического плана. В первую очередь, это реализация условий, необходимых для протекания реакции управляемого термоядерного синтеза. Вместе с этим, существует проблема поиска и испытания материалов, и на их основе создания ответственных узлов и комплектующих, способных работать в потоках высокоэнергетических частиц при экстремальных тепловых нагрузках, которые будут иметь место внутри разрядной камеры будущего термоядерного реактора.

В целях проведения исследований по взаимодействию материалов ответственных узлов и комплектующих термоядерных реакторов будущего с высокотемпературной плазмой, в г. Курчатов (Республика Казахстан) создается стендовый комплекс казахстанского материаловедческого токамака КТМ. Уникальный проект КТМ позволит испытывать материалы под тепловой нагрузкой на них до 20 МВт/м^2 . Кроме того, оригинальные проектные решения КТМ позволят решать множество различных задач как плазмофизического, так и инженерно-технического характера.

Условие возникновения и качество плазменного разряда в установке токамак напрямую зависит от возможности реализации довольно сложной диаграммы эволюции токов в обмотках её электромагнитной системы. Для электромагнитной системы токамака КТМ характерно наличие: обмотки центрального соленоида (CS), обмоток полоидального поля (PF1-PF6), обмоток быстрой вертикальной стабилизации плазмы (HFC (u/d)), обмотки тороидального поля (TF) [1].

Создание исполнительного механизма системы управления плазмой в виде системы импульсного электропитания обмоток токамака и её системы управления с необходимым техническим, математическим и информационным обеспечением представляет собой нетривиальную задачу. Необходимо учитывать требования,

предъявляемые к такой системе со стороны сценариев изменения тока в обмотках токамака, ограничения накладываемые на источники электропитания со стороны питающей сети и нагрузки. Учитывая, что в процессе плазменного разряда система импульсного электропитания токамака КТМ будет обеспечивать управление потоками мощности на уровне 126 МВА - необходимо обеспечить согласованную, безаварийную работу всего оборудования, входящего в состав вышеуказанной системы [1].

Диссертационная работа посвящена исследованию процессов, протекающих в электромагнитной системе токамака КТМ и контуре её электропитания, разработке системы импульсного электропитания как исполнительного механизма системы управления плазмой, созданию и внедрению на основе полученных результатов алгоритмов управления и противоаварийной защиты электротехнического и технологического оборудования комплекса КТМ.

Актуальность работы. В настоящее время решение грядущей энергетической и экологической проблемы мировое научное сообщество видит в развитии технологий управляемого термоядерного синтеза. Наиболее перспективным прототипом термоядерного реактора будущего признана установка типа токамак. Для реализации необходимых сценариев изменения тока в обмотках казахстанского материаловедческого токамака КТМ создана специализированная система импульсного электропитания, представляющая собой сложный, распределенный электротехнический комплекс с собственной системой цифрового управления. Учитывая стоимость силового электрооборудования, входящего в систему импульсного электропитания токамака, характер работы данного оборудования в условиях проведения плазменного разряда, трудоемкость ликвидации последствий возможных аварий – для разработки и отладки алгоритмов управления и противоаварийной защиты системы импульсного электропитания представляется целесообразным кроме классических расчетных методов применение методов аналитического и имитационного компьютерного моделирования.

Полученная компьютерная модель системы электропитания КТМ будет применяться для оценки режимов работы системы при каждом кардинальном изменении базового сценария плазменного разряда. Разработанные и верифицированные при помощи вышеуказанной модели алгоритмы управления будут использованы в контуре управления источниками импульсного электропитания токамака КТМ. Подходы, примененные при формализации и верификации алгоритмов противоаварийного управления и приведения оборудования системы электропитания токамака КТМ в безопасное состояние, расширят базу знаний по формализации и верификации алгоритмов противоаварийных реактивных дискретно-событийных систем.

Работа выполнена в рамках проекта создания стендового комплекса казахстанского материаловедческого токамака КТМ, тем не менее её результаты могут быть использованы при разработке новых или модернизации действующих установок типа токамак, а также при создании или модернизации сверхмощных источников электропитания и их систем управления в других областях науки и отраслях промышленности.

Основной целью данной работы является достижение требуемых параметров, обеспечение устойчивости и повышение качества плазменных разрядов на установке КТМ, обеспечение безопасности работы оборудования электротехнического комплекса за счет применения оригинальных схмотехнических решений, алгоритмов управления и защиты, обеспечение удобства эксплуатации и оперативной диагностики оборудования КТМ, расширение базы знаний в области технического, математического и информационного обеспечения систем цифрового управления и противоаварийной защиты сверхмощных источников электропитания.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Анализ исходных данных – диаграмм (сценариев) эволюции токов в обмотках токамака КТМ для базового сценария плазменного разряда, требований

к источникам импульсного электропитания со стороны электромагнитной системы КТМ и электроснабжающей сети;

2. Исследование мирового опыта реализации систем импульсного электропитания токамаков, алгоритмов их диагностики и управления;

3. Разработка схемотехнических решений источников электропитания КТМ, как исполнительного механизма системы управления плазмой;

4. Реализация аналитической компьютерной модели источников электропитания КТМ, совместно с их системой цифрового управления;

5. Разработка, верификация и внедрение алгоритмов управления и диагностики источников импульсного электропитания КТМ;

6. Создание, верификация и внедрение имитационной компьютерной модели, а также соответствующих алгоритмов противоаварийной защиты системы электропитания КТМ;

7. Проведение комплексных испытаний источников электропитания в условиях плазменного разряда на установке КТМ.

Объектом исследований является система электропитания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ, как исполнительный механизм системы управления плазмой.

Предметом исследований являются схемотехнические решения, алгоритмы и методы управления преобразовательным оборудованием систем импульсного электропитания сверхмощных электрофизических установок, алгоритмы противоаварийной защиты электротехнического оборудования и приведения данного оборудования в безопасное состояние.

Методы исследования базируются на теории системного анализа, теории автоматического управления, дискретной математики и математическом аппарате сетей Петри, теории вероятностей, компьютерном моделировании электротехнического оборудования и его систем управления. Для проведения модельных экспериментов использовался пакет Simulink/Simscape системы Matlab, а также специализированное программное обеспечение CPN Tools.

Научная новизна заключается в том, что в работе впервые:

1. Применены оригинальные схемотехнические решения для источников импульсного электропитания токамака КТМ, как элементов системы управления плазмой, позволяющие улучшить динамические параметры системы управления, воспроизводить требуемые диаграммы эволюции токов в обмотках электромагнитной системы токамака КТМ, учитывая все имеющиеся ограничения, эффективно решать проблему деления токов, протекающих через параллельно соединенные силовые полупроводниковые элементы, осуществлять автоматический непрерывный контроль и диагностику состояния каждого элемента системы на всех этапах проведения эксперимента. Предложена оптимизированная, нехарактерная для других систем импульсного электропитания токамаков схема ключа-прерывателя постоянного тока, базирующаяся исключительно на полупроводниковых приборах, совместно с соответствующей подсистемой управления и диагностики, позволяющие надежно переключать ток в обмотке центрального соленоида КТМ за минимально возможное в имеющихся условиях время. Разработаны и математически описаны алгоритмы диагностики силового электрооборудования комплекса КТМ.

2. Разработана аналитическая компьютерная модель источников импульсного электропитания токамака КТМ, позволяющая моделировать режимы работы системы импульсного электропитания при различных вариантах базового сценария плазменного разряда, осуществлять синтез и настройку контуров её управления. Модель позволяет анализировать все ключевые параметры и режимы работы системы импульсного электропитания КТМ с целью выявления возможных аварийных ситуаций до загрузки сценария разряда в реальную систему управления источниками электропитания. При разработке модели учтены ключевые характеристики электротехнического оборудования, питающей сети, обмоток электромагнитной системы, накладывающие ограничения на возможности системы импульсного электропитания токамака КТМ.

3. Предложены, верифицированы и внедрены алгоритмы управления источниками импульсного электропитания токамака КТМ. Осуществлен синтез регуляторов в контуре управления напряжением на обмотках электромагнитной

системы КТМ. Разработан алгоритм управления источником питания обмотки центрального соленоида (CS), использующий в процессе реверса тока в обмотке как отдельный режим управления встречно направленными комплектами преобразователей, так и совместный для минимизации токовой паузы в процессе прохождения тока через нулевое значение. Таким образом, повышается эффективность использования мощности из питающей сети, обеспечивается реверс тока в обмотке CS без токовой паузы, что очень критично для условий существования плазмы в токамаке. Вместе с этим, алгоритм обеспечивает совместную и согласованную работу преобразователей источника питания CS и полупроводникового ключа-прерывателя постоянного тока с целью получения максимальной возможной производной тока в обмотке CS на стадии инициации разряда и роста тока плазмы.

4. Реализована компьютерная имитационная модель системы противоаварийной защиты комплекса КТМ в среде CPN Tools. Предложены, верифицированы и внедрены алгоритмы противоаварийной защиты и приведения системы электропитания токамака КТМ в безопасное состояние, отличающиеся от известных применением при их формализации раскрашенных временных сетей Петри, что в конечном итоге позволяет минимизировать возможность ошибки в процессе работы распределённой реактивной системы противоаварийной защиты комплекса КТМ, работающей в дискретно-событийном режиме.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Схемотехнические решения источников электропитания обмоток ЭМС токамака КТМ, как элементы системы управления плазмой. Алгоритмы диагностики силового электрооборудования комплекса КТМ. Положение соответствует пунктам: 14 – «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования, (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСПП и др.», 18 – «Средства и методы проектирования технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ» паспорта специальности «05.13.06».

2. Компьютерная аналитическая модель системы электропитания токамака КТМ, позволяющая анализировать режимы работы системы электропитания на всех этапах сценария плазменного разряда установки КТМ. Положение соответствует пунктам: 4 – «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация», 6 – «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления» паспорта специальности «05.13.06».

3. Алгоритмы управления источниками питания, в том числе источником питания обмотки центрального соленоида (CS), реализующий совместную работу преобразовательного оборудования и ключа-прерывателя постоянного тока, обеспечивающий требуемые сценарии изменения тока в обмотке CS, при этом позволяющий эффективно использовать потребляемую из сети мощность. Положение соответствует пунктам: 4 – «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация», 18 – «Средства и методы проектирования технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ» паспорта специальности «05.13.06».

4. Компьютерная имитационная модель системы противоаварийной защиты и соответствующие алгоритмы защиты и приведения системы электропитания токамака КТМ в безопасное состояние, минимизирующие возможность ошибки в процессе работы системы противоаварийной защиты комплекса КТМ. Положение соответствует пунктам: 4 - «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация», 16 - «Теоретические основы, методы и алгоритмы построения экспертных и диалоговых подсистем, включенных в АСУТП, АСУП, АСТПП и др.» паспорта специальности «05.13.06».

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанная система импульсного электропитания успешно внедрена в составе энергетического комплекса КТМ, обеспечивающего электропитание обмоток электромагнитной системы установки. Примененные схмотехнические решения позволяют улучшить динамические параметры системы управления плазмой, осуществлять оперативный контроль и диагностику состояния всех элементов системы. Схмотехническое решение ключа-прерывателя постоянного тока, базирующееся исключительно на полупроводниковых приборах и его подсистема управления и диагностики позволяют переключать ток в обмотке центрального соленоида ЭМС КТМ в минимально возможные сроки с высокой степенью надежности.

С использованием разработанной компьютерной аналитической модели исследованы режимы работы системы электропитания, верифицированы и внедрены в составе системы цифрового управления источниками импульсного электропитания предложенные алгоритмы управления.

Реализована компьютерная имитационная модель системы противоаварийной защиты, при помощи которой верифицированы и внедрены предложенные алгоритмы диагностики и противоаварийной защиты электроэнергетического комплекса КТМ.

Отдельные результаты исследования внедрены в учебный процесс ИЯТШ НИ ТПУ в рамках учебного курса «Системы автоматизации экспериментов на термоядерных установках».

Полученные результаты позволяют расширить схмотехническую базу систем импульсного электропитания сверхмощных электрофизических установок, базу математического и информационного обеспечения систем управления такими электротехническими комплексами, а также круг унифицированных решений для задач аналитического и имитационного моделирования технологических процессов, их систем управления и противоаварийной защиты.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждена успешным испытанием системы импульсного электропитания обмоток электромагнитной системы совместно с её системой цифрового управления и

противоаварийной защиты токамака КТМ, являющегося одной из базовых установок Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», а принятые в работе авторские решения основаны на анализе практики и обобщении передового опыта, проверенных методах и методиках исследований в области автоматического управления, теории математического моделирования, силовой электроники и электротехники.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на:

1. Конференции по малым аппаратам термоядерного синтеза (19th IAEA TM on Research Using Small Fusion Devices), Республика Казахстан, г. Курчатов, 2009 г.
2. VII Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине», Российская Федерация, г. Томск, 2015 г.
3. The 21st International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion, Kazakhstan, Astana, 2016.
4. IV Inter. Sci. and Tech. Conf. «Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power, Sept. 27-30, 2016, Moscow», НИКИЕТ, 2016.
5. XIII Международной конференции «Газоразрядная плазма и её применение», Российская Федерация, г. Новосибирск, 2017 г.
6. XXIV Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» на базе Национального исследовательского университета «Московского энергетического института», Российская Федерация, г. Москва, 2018 г.
7. VIII Международной конференции «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала», Республика Казахстан, г. Курчатов, 2018 г.
8. V Международной научно-технической конференции НИКИЭТ «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», Российская Федерация, г. Москва, 2018 г.

9. Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине (ФТПНПМ-2019)», Российская Федерация, г. Томск, 2019 г.

Публикации по теме диссертации включают 15 печатных работ: 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ из них 2 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и WoS; 1 статья в зарубежном журнале, индексируемом в Scopus; 1 статья в журнале, рекомендуемом Министерством образования и науки Республики Казахстан и 9 докладов и тезисов в сборниках трудов конференций; получены: 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и 2 акта внедрения результатов работы.

Вместе с этим, результаты исследований отражены в соответствующих научно-технических отчетах, в технических и рабочих проектах на систему импульсного электропитания электромагнитной системы установки КТМ и её систему цифрового управления.

Личный вклад автора. Основные исследования, представленные в диссертации, выполнены автором лично, либо при непосредственном его участии. Выбор направления исследований выполнен совместно с научным руководителем. В рамках реализации данной работы автором выполнено:

- Анализ исходных данных в целях разработки и внедрения системы импульсного электропитания токамака КТМ, как исполнительного механизма системы управления плазмой;
- Анализ мирового опыта построения систем импульсного электропитания сверхмощных электрофизических установок типа токамак;
- Непосредственное участие в разработке схемотехнических решений системы импульсного электропитания комплекса КТМ;
- Постановка задач и непосредственное участие в компьютерном моделировании системы импульсного электропитания токамака КТМ совместно с системой цифрового управления и противоаварийной защиты;

- Проведение теоретических и экспериментальных исследований в целях осуществления синтеза алгоритмов управления и противоаварийной защиты;
- Верификация с помощью разработанных компьютерных моделей алгоритмов управления источниками импульсного электропитания токамака КТМ и их противоаварийной защиты;
- Внедрение системы импульсного электропитания, алгоритмов управления и противоаварийной защиты электроэнергетического оборудования на комплексе казахстанского материаловедческого токамака КТМ;
- Сравнение результатов, полученных практически с результатами, полученными в ходе теоретических исследований;
- Опубликование результатов исследований.

Диссертационная работа выполнялась в рамках реализации: Республиканской бюджетной программы Республики Казахстан (005, 059, 045 и 106) «Создание Казахстанского термоядерного материаловедческого реактора Токамак КТМ»; Целевой бюджетной программы Республики Казахстан «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ»; Соглашения о совместном использовании токамака КТМ странами СНГ в рамках Программы сотрудничества государств-участников СНГ в области мирного использования атомной энергии "СОТРУДНИЧЕСТВО "АТОМ-СНГ"; Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»; НИОКР «Совершенствование системы управления плазмой, сбора и обработки экспериментальных данных Казахстанского материаловедческого токамака (КТМ)» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-11-2019-013 от 11 октября 2019 г., идентификатор RFMEFI58519X0007); Межправительственного соглашения по управляемому термоядерному синтезу Республики Казахстан и Европейского сообщества по атомной энергии; Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между РГП

«Национальный ядерный центр Республики Казахстан» и Международной организацией ITER.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы и пяти приложений. Объем работы составляет 211 страниц, включая 69 рисунков и 24 таблицы.

Первая глава посвящена исследованию объекта управления, характеристик электромагнитной системы установки КТМ, параметров базового сценария плазменного разряда, накладывающих императивные требования к системе импульсного электропитания токамака КТМ, как к исполнительному механизму системы управления плазмой, проведению анализа общемирового опыта создания систем импульсного электропитания и их систем управления для установок типа токамак.

Выявлены положительные и отрицательные стороны отдельных решений, определены возможности и направления по их развитию и улучшению. Обоснована необходимость разработки нестандартных электротехнических устройств и создания компьютерной аналитической модели на этапе проведения исследований, разработки и внедрения системы импульсного электропитания токамака КТМ, её системы управления и противоаварийной защиты.

Во второй главе особое внимание уделено разработке и оптимизации для целей управления и диагностики электротехнического комплекса СИЭП токамака КТМ, как исполнительного механизма системы управления плазмой.

Определены основные требования к СИЭП токамака КТМ и её системе управления. Приведены структурная схема электроэнергетического комплекса КТМ, основные электротехнические решения и характеристики источников электропитания, их функции, проектные режимы работы, а также используемое в их составе электротехническое оборудование. В связи с отсутствием типовых промышленных образцов отдельных электротехнических комплектующих и преобразовательного оборудования, удовлетворяющих требованиям компоновки системы электропитания токамака КТМ, разработано специализированное

(нестандартное) электрооборудование. В процессе разработки данное оборудование оптимизированно для целей управления и диагностики.

В целях последующей реализации комплексной компьютерной аналитической модели системы электропитания обмоток ЭМС токамака КТМ совместно с её системой цифрового управления в среде Simulink/Simscapе системы Matlab подготовлены необходимые исходные данные. Разработаны и оптимизированы необходимые схемы замещения. Рассчитаны и переведены в относительные единицы системы Matlab электротехнические параметры оборудования энергокомплекса КТМ.

Третья глава посвящена разработке комплексной аналитической модели системы электропитания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ в среде Simulink/Simscapе системы Matlab совместно с её системой цифрового управления, разработке, верификации и внедрению соответствующих алгоритмов управления и диагностики.

В целях уточнения режимов работы источников импульсного электропитания токамака КТМ проведено исследование их статических и динамических характеристик. Во избежание возможных аварийных ситуаций обозначена необходимость ограничения диапазона изменения угла управления тиристорными преобразователями, приведены расчетные соотношения для вычисления границ допустимого диапазона.

Представлена функциональная схема САУ напряжением источников питания КТМ, определены структура и основные требования к цифровому регулятору выходного напряжения, осуществлен его синтез. Приведены основные соотношения, описывающие синтезированный регулятор, а также используемые в работе методы его настройки.

Разработана специализированная библиотека модулей Simulink/Simscapе, с использованием которой были построены модели отдельных ИП. Для проверки адекватности разработанных моделей проведена серия экспериментов, показавшая хорошую корреляцию экспериментальных данных, полученных в реальных разрядах токамака КТМ и данных, полученных при компьютерном моделировании.

С использованием верифицированных моделей для каждого типа ИП рассчитаны их внешние характеристики, определены возможные режимы работы и их границы, построены соответствующие номограммы.

В целях реализации требуемого сценария изменения тока в обмотке CS ЭМС токамака КТМ предложен, верифицирован и внедрен алгоритм управления ИП обмотки CS, сочетающий в себе совместный и отдельный режим управления встречно-направленными комплектами ТП в режиме реверсирования тока в нагрузке с использованием ключа-прерывателя постоянного тока в контуре электропитания.

На основе разработанных ранее моделей отдельных источников питания реализована и верифицирована в ходе проведения физического пуска установки КТМ комплексная Simulink/Simscapе модель СИЭП КТМ совместно с её СЦУ.

В четвертой главе представлен процесс и результаты исследований, направленных на разработку и верификацию противоаварийных алгоритмов и алгоритмов по приведению систем импульсного и внешнего электропитания установки КТМ в безопасное состояние.

Обоснована необходимость создания системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ, как распределенной реактивной дискретно-событийной системы. Описан состав системы противоаварийной защиты и обозначены ее границы. Определены все возможные и детектируемые для электротехнического комплекса токамака КТМ типы аварий. В целях эффективной реализации противоаварийных действий и действий по приведению электротехнического оборудования комплекса КТМ в безопасное состояние разработаны, формализованы, верифицированы при помощи компьютерного имитационного моделирования в среде CPN Tools соответствующие противоаварийные алгоритмы.

В Приложениях А-Д представлены вспомогательные и ссылочные материалы, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, акты внедрения результатов диссертационной работы и протокол проведения физического пуска установки КТМ.

Глава 1. Анализ объекта управления и проблем создания системы импульсного электропитания токамака КТМ

В процессе плазменного разряда в установках типа токамак первостепенной задачей системы магнитного управления плазмой (СУП) является создание и изменение по сложным сценариям магнитных полей, изолирующих плазму от стенок вакуумной камеры установки, инициирующих плазменный разряд и обеспечивающих рост, стабилизацию и гашение тока плазмы, а также задающих её форму и положение в пространстве. Требуемые магнитные поля создаются и изменяются благодаря реализации соответствующей эволюции токов в обмотках электромагнитной системы токамака (ЭМС), посредством специализированных источников импульсного электропитания с собственной системой управления.

Принимая во внимание особенности поведения плазмы – расчетный сценарий эволюции токов в обмотках ЭМС токамака в процессе разряда корректируется СУП на основе данных обратной связи, преимущественно с датчиков системы электромагнитной диагностики (ЭМД). Расчет и корректировка сценариев изменения тока в обмотках ЭМС производится СУП с учетом электромагнитных взаимодействий между конструктивными элементами установки (обмотками ЭМС, элементами вакуумной камеры и др.) и создаваемой плазмой. При этом, СУП обеспечивается совместная и согласованная работа всех источников импульсного электропитания, посредством передачи в режиме реального времени соответствующих уставок в их систему управления.

Таким образом, система автоматизации эксперимента токамака (САЭ) является многоуровневой системой, включающей в себя СУП, сложносоставные комплексы в виде источников импульсного электропитания с собственной системой управления, нагруженных на обмотки ЭМС токамака, а также измерительную часть в виде системы ЭМД. На рисунке 1.1 представлена структурная схема элементов САЭ токамака КТМ с системами (выделены красным пунктиром), разработке, автоматизации и внедрению которых посвящена данная диссертационная работа.

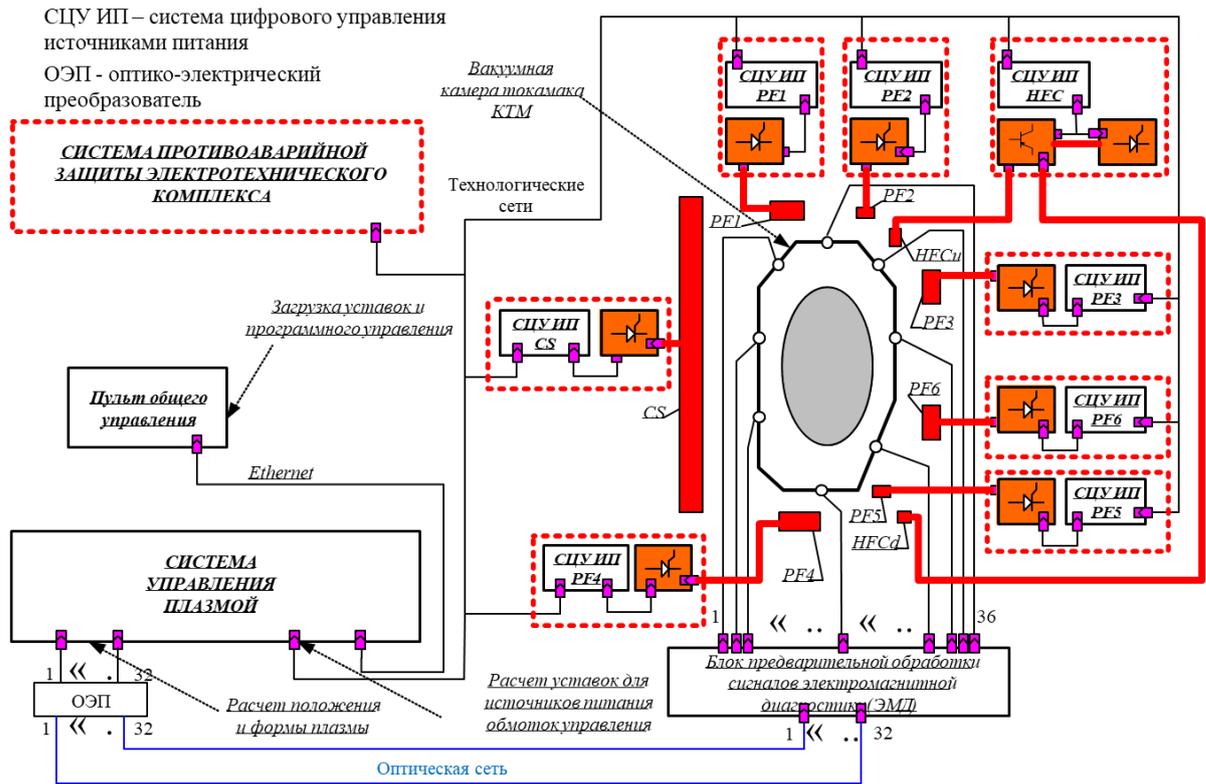


Рисунок 1.1 – Структурная схема элементов САЭ комплекса КТМ

Особенности аппаратной и программной реализации источников импульсного электропитания с высокой степенью автоматизации, как сложносоставных исполнительных механизмов СУП, оказывают существенное влияние на качество управления плазмой в токамаках, статические и динамические характеристики СУП в целом.

Принимая во внимание технологическую сложность и существенную финансовую стоимость объекта управления, ограничения, накладываемые его конструктивными элементами - актуальной задачей становится разработка технического, математического и информационного обеспечения системы управления источниками импульсного электропитания с широким применением методов компьютерного моделирования на всех этапах их разработки и внедрения.

В целях реализации соответствующих моделей, разработки и верификации с их помощью алгоритмов управления и противоаварийной защиты источников электропитания токамака КТМ, учитывая уникальность каждой отдельной установки типа токамак и, как следствие, отсутствие типовых стандартных

решений при создании таких систем – необходимо разработать и идентифицировать параметры всех элементов, входящих в их состав.

1.1. Исследование характеристик электромагнитной системы установки КТМ, определение требований, предъявляемых к системе импульсного электропитания

Императивные требования к системе электропитания обмоток электромагнитной системы токамака, как к исполнительному механизму системы управления плазмой, определяются сценариями изменения токов в обмотках во время плазменного разряда, а также основными электротехническими параметрами данных обмоток [1, 2, 3]. В таблице 1.1 приведены основные геометрические и электротехнические параметры обмоток электромагнитной системы токамака КТМ. В данной таблице: R – координата центра сечения обмотки по большому радиусу, Z – координата центра сечения обмотки по вертикали, ΔR – радиальный размер сечения обмотки, ΔZ – размер сечения обмотки по вертикали, $N_{вит}$ – количество витков в обмотке, $I_{макс}$ – максимальный ток в обмотке, $U_{макс}$ – максимальное напряжение на обмотке.

Таблица 1.1 – Основные параметры обмоток электромагнитной системы токамака КТМ [4]

Параметр / Обмотка	R , м	Z , м	ΔR , м	ΔZ , м	$N_{вит}$, шт	$I_{макс}$, А	$U_{макс}$, В
CS	0.2250	0.1200	0.0800	2.3000	423	30000	3000
PF1	0.5750	1.2850	0.1970	0.0840	40	18000	1000
PF2	1.2300	1.2560	0.0800	0.0420	8	18000	1000
PF3	1.6500	0.8550	0.1000	0.1660	40	10000	1000
PF6	1.6500	-0.2400	0.1000	0.1660	40	10000	1000
PF5	1.2300	-1.0460	0.0800	0.0840	16	30000	1500
PF4	0.5750	-1.3170	0.3000	0.1040	48	30000	1000
TF	0.9520	0.0000	1.9040	3.2420	80	60000	1000
HFCup	1.3620	1.1500	0.0640	0.0700	36	3000	1000
HFCd	1.3620	-1.1780	0.0640	0.0700	36	3000	1000

Пространственное расположение обмоток ЭМС и сечение установки КТМ изображены на рисунке 1.2. Условные обозначения: обмотка центрального соленоида (CS), обмотки полоидальных полей (PF1—PF6), обмотка тороидального поля (TF) и обмотки быстрого управления и стабилизации смещения плазмы по вертикали (HFC +/- (up/d)) [1, 5].

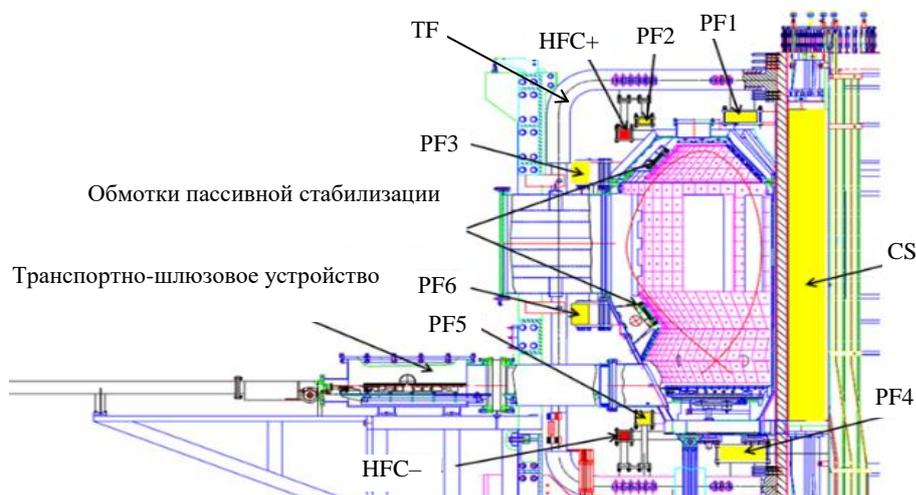


Рисунок 1.2 – Сечение токамака КТМ [1, 4, 5]

В соответствии с методикой, изложенной в [6], учитывая геометрические размеры и пространственное размещение обмоток [4], а также данные, полученные из научно-технических отчетов [2], рассчитаны основные электротехнические параметры обмоток ЭМС токамака КТМ. Собственные индуктивности и сопротивления обмоток уточнены в результате обработки экспериментальных данных разрядов КТМ и методом прямых измерений. Индуктивность и сопротивление обмотки HFC рассчитаны с учетом последовательного соединения обмоток HFC+ и HFC– встречно по магнитному потоку [1, 5].

При расчетах использовались соотношения, для нахождения индуктивностей обмоток прямоугольного сечения, квадратного сечения, индуктивности обмотки TF имеющей сечение близкое к прямоугольному, а также индуктивности последовательно соединенных обмоток HFC+ и HFC- как индуктивностей сложных контуров. Для расчета взаимных индуктивностей обмоток применен метод круговых контуров [6].

Вышеуказанные соотношения являются частными случаями выражений для нахождения собственной индуктивности L и взаимных индуктивностей M контуров

через соответствующие магнитные потоки Ψ и токи i в данных контурах:

$$L = \frac{\Psi_L}{i}; M_{12} = \frac{\Psi_{2M}}{i_1}; M_{21} = \frac{\Psi_{1M}}{i_2}, \text{ где: } \Psi_L - \text{поток самоиндукции контура; } i - \text{ток в контуре;}$$

Ψ_{2M} – поток взаимной индукции второго контура, обусловленный током i_1 первого контура; Ψ_{1M} – поток взаимной индукции первого контура, обусловленный током i_2 второго контура [6]. Электротехнические параметры обмоток электромагнитной системы токамака КТМ приведены в Приложении А, в таблице А.1 [2, 3, 5].

Согласно базовому (инженерному, рассчитанному для номинального режима работы установки) среднестатистическому сценарию плазменного разряда [2] токи и напряжения обмоток электромагнитной системы установки КТМ в процессе разряда должны изменяться по сценариям, представленным в Приложении А, в таблицах А.2 и А.3 [2, 3]. Графики изменений токов и напряжений в интервалах времени базового сценария плазменного разряда отображены в Приложении А на рисунках А.1 и А.2 [2, 3].

В целях оценки величины и характера изменения мощности в контуре электропитания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ, произведена реконструкция сценариев изменения мощности на всех этапах базового сценария рабочего импульса установки [2]. Ток в обмотке вычислялся из соотношения $I(t) = I_0 \exp(-\frac{t}{T})$, где I_0 – начальный ток в обмотке; t – текущее время; T – постоянная времени. Постоянная времени T при этом определяется отношением $T = \frac{L}{R}$, где L – индуктивность, а R – активное сопротивление контура. Полная мощность вычисляется по формуле $S = U \times I$, где U – значение напряжения на обмотке, I – значение тока в контуре. Активная мощность определяется из соотношения $P = I^2 \times R$, где I – ток в контуре, R – активное сопротивление контура. Используя правило треугольника мощностей находится реактивная составляющая мощности $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$, где S – полная потребляемая мощность, а P – активная потребляемая мощность.

На этапе ввода тока в обмотки электромагнитной системы КТМ максимальная активная составляющая потребляемой мощности достигает $P = 60,11$ МВт, полная мощность $S = 91,66$ МВА, а реактивная мощность $Q = 69,20$ Мвар.

На этапе разряда в некоторые обмотки продолжает вводиться ток, тогда как из других наоборот происходит его инвертирование в сеть. Таким образом, потребление реактивной мощности источниками питания обмоток в некоторой степени взаимно компенсируется. Вместе с этим, на данном этапе подключается источник питания высокочастотного нагрева плазмы, при этом, максимальная активная составляющая мощности достигает $P = 77,71$ МВт, полная мощность $S = 125,09$ МВА, а реактивная мощность Q изменяется от $-44,23$ до $75,24$ Мвар (с учетом направления потока реактивной мощности).

На этапе вывода тока из обмоток электромагнитной системы КТМ источник электропитания ВЧ-нагрева плазмы отключен. Максимальная активная составляющая мощности достигает $P = 48,88$ МВт, полная мощность $S = 80,43$ МВА, а реактивная $Q = -63,87$ Мвар.

1.2. Исследование схемотехнических и алгоритмических решений при создании систем импульсного электропитания и их систем управления для установок типа токамак

В исследовании систем импульсного электропитания и их систем управления структурно выделяются следующие аспекты и направления:

- способ подключения систем импульсного электропитания к источнику электроэнергии;
- схемы построения источников импульсного электропитания в зависимости от целевого назначения конкретного источника питания и требований к нему со стороны сценариев изменения токов в обмотках электромагнитной системы;
- схемы построения и типы преобразователей, используемые в составе источников питания;
- коммутационное оборудование, используемое в источниках питания;

- системы и алгоритмы управления, способы оперативной диагностики и противоаварийной защиты источников импульсного электропитания.

1.2.1. Способы подключения к источнику электроэнергии

В решении вопросов с подключением систем импульсного электропитания установок типа токамак к источнику электроэнергии в настоящее время можно выделить два основных направления – использование электросилового питания напрямую от сети или с применением промежуточных накопителей энергии, в случае если прямое подключение становится невозможным.

Установки – ITER, T-15, EAST, DTT [7, 8, 9, 10] используют прямое подключение систем импульсного электропитания к электросети. Данное решение обусловлено наличием в районе размещения вышеуказанных установок мощной электросетевой инфраструктуры, способной обеспечить системы импульсного питания электроэнергией требуемой мощности в любое необходимое время, что позволяет отказаться от систем промежуточного накопления энергии.

Так, например, для системы электропитания установки ITER специально сооружается линия электропередач напряжением 400 кВ с подключением к французской электросети [7, 11]. Система электропитания токамака DTT [10] также предусматривает прямое подключение к национальной сети сверхвысокого напряжения 400 кВ Италии посредством строительства промежуточной подстанции 400 кВ/150 кВ и конечной подстанции 150/36 кВ, расположенной на территории Исследовательского Центра ENEA (г. Фраскатти). Проектом электроснабжения токамака EAST предусматривается сооружение двух отдельных линий электропередач напряжением 110 кВ, запитанных от различных точек подключения [9]. Система импульсного электропитания EAST питается от одного понижающего трансформатора 50 МВА, при этом суммарная активная мощность, потребляемая источниками питания из сети, составляет 52,48 МВт.

Преобразовательный комплекс импульсного электропитания токамака T-15 запитан через систему понижающих трансформаторов напрямую от подстанции 10

кВ, построенной для установки T-10 [8]. Пиковая активная потребляемая мощность для источников питания установки T-15 составляет 170 МВт, при этом максимальная реактивная потребляемая мощность достигает 170 Мвар.

Источники импульсного электропитания установок JET и JT-60SA, совместно с питанием от электрической сети используют электроснабжение от установленных промежуточных накопителей в виде мотор-генераторов [12, 13, 14] (JT-60SA использует мотор-генераторы и трансформаторную подстанцию, сооруженные для установки JT-60).

Установка JET питается от единой электрической сети Великобритании напряжением 400 кВ. Система импульсного электропитания JET совместно с системами дополнительного нагрева плазмы потребляет до 1 ГВА полной мощности [12]. Существующие ограничения со стороны питающей электросети не позволяют питать вышеуказанные системы напрямую, вследствие чего принято решение о размещении на площадке JET двух идентичных мотор-генераторов, способных питать нагрузку током до 67 кА при напряжении до 6 кВ.

Токамак JT-60 использовал аналогичную JET схему подключения к питающей электросети с использованием промежуточных накопителей в виде трех мотор-генераторов [13]. Для питания электроприемников установки JT-60 использовалось подключение к сети 275 кВ. При этом, источник питания обмотки тороидального поля имел комбинированное подключение – напрямую от сети через понижающий трансформатор 275/18 кВ мощностью 200 МВА, а также от мотор-генератора мощностью 215 МВА. Обмотки полоидальных полей были запитаны от мотор-генератора мощностью 500 МВА и напряжением 18 кВ. Третий мотор-генератор обеспечивал электроснабжением системы дополнительного нагрева плазмы. Таким образом, удалось снизить потребление электроприемниками JT-60 активной мощности из сети до уровня, не превышающего 200 МВт.

Использование промежуточных накопителей энергии бесспорно позволяет создать существенный запас необходимой энергии, ликвидировать негативные воздействия на питающую сеть, тем не менее любые варианты использования

промежуточных накопителей, в том числе мотор-генераторов обладают довольно низким коэффициентом полезного действия. Применительно к мотор-генераторам речь идет о 45-65%, поскольку в процессах преобразования электрической энергии в механическую и обратно имеют место быть довольно высокие потери. Вместе с этим, сооружение и эксплуатация мотор-генераторов требует особого внимания при изготовлении и монтаже оборудования, необходимости постоянного мониторинга прочности конструкции, организации сложных систем синхронизации и управления, и как следствие - необходимости высоких капиталовложений в такой электромеханический комплекс [12].

1.2.2. Схемы построения источников электропитания в зависимости от их целевого назначения

Функционально источники питания электромагнитной системы установки типа токамак разделяются на источники питания обмотки тороидального поля, изолирующей плазму от стенок вакуумной камеры на протяжении плазменного разряда (препятствующей дрейфу заряженных частиц плазмы поперек тороидального электромагнитного поля) и источники питания обмоток полоидальных полей, отвечающие за пробой рабочего газа, подъем тока плазмы и её разогрев, контролирующие позицию и форму плазмы в вакуумной камере, а также отвечающие за стабилизацию и корректировку быстрых смещений плазмы. В связи с этим, в группе источников питания обмоток полоидальных полей выделяются: источники питания центрального соленоида; полоидальных обмоток, отвечающих за равновесие, форму и положение плазмы; обмоток быстрого управления плазмой.

Схемотехника источников питания обмотки тороидального поля довольно разнообразна. Основными требованиями и характеристиками источника питания обмотки тороидального поля являются – минимизация пульсации напряжения на выходе, высокая степень стабильности поддержания заданного тока, энергоёмкость преобразовательного оборудования, поскольку в основном обмотка

тороидального поля предусматривает самые высокие значения действующего тока на протяжении плазменного разряда и самое длительное время его циркуляции в контуре. Требования к максимальному уровню выпрямленного напряжения различны и зависят от типа проводника обмотки, а также типа её исполнения (цельная или секционированная). В случае сверхпроводимой обмотки напряжение на выходе источника питания тороидального поля относительно невелико, что существенно снижает его установленную мощность [9, 14]. Требования к быстродействию источников питания тороидального поля исходя из токового сценария в них несущественны. Токосценарий обмотки тороидального поля установки КТМ отображен на рисунке 1.3.

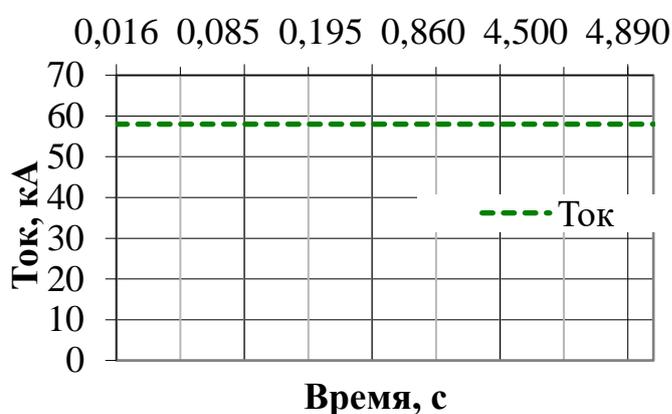


Рисунок 1.3 – Базовый сценарий изменения тока в обмотке TF токамака КТМ в процессе плазменного разряда [2, 3]

На протяжении плазменного разряда ток в тороидальной обмотке КТМ стабилизируется на уровне 58 кА.

Источники питания обмоток тороидального поля установок – ITER, JT-60SA, EAST [7, 9, 14, 15, 16] реализованы на базе AC/DC преобразователей, подключенных к понижающим трансформаторам, запитанным непосредственно от

сети. AC/DC преобразователи построены по мостовой 6-пульсной схеме выпрямления на полууправляемых тиристорах типа SCR. Мостовые схемы большинства источников питания обмоток тороидального поля питаются от разноименных обмоток трансформаторов с фазовым сдвигом мгновенных значений напряжений в 30 эл. град., что позволяет объединить 6-пульсные мостовые схемы в 12-пульсную. Данное решение позволяет существенно снизить пульсации напряжения на выходе источника питания, а также улучшить форму потребляемого из сети тока. Поскольку ток в обмотке тороидального поля не изменяет свое направление в течении плазменного разряда - источники питания

построены для работы в 2-х квадрантном режиме. Топология источников питания обмоток тороидального поля установок ITER и JT-60SA приведена на рисунке 1.4.

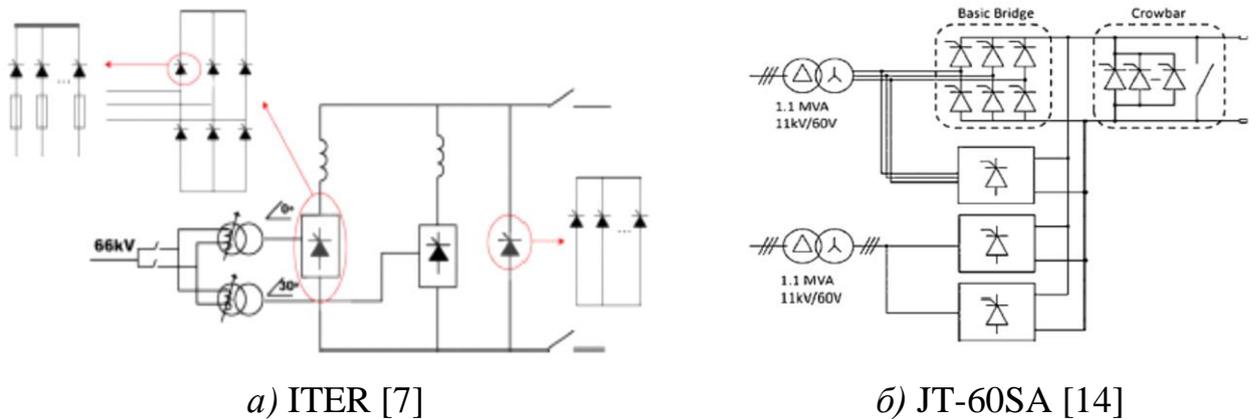


Рисунок 1.4 – Топология источника питания обмотки тороидального поля

В отличие от вышеуказанных установок в токамаке JET используется комбинированная схема электропитания обмотки TF. В момент ввода тока в обмотку работают статические диодные преобразователи, запитанные от одного из двух имеющихся мотор-генераторов. В процессе стабилизации и поддержания тока используются два идентичных преобразовательных модуля, построенных по 6-пульсной схеме на тиристорах типа SCR, запитанных от электроснабжающей сети. Максимальное напряжение данных модулей ограничено на уровне 1,7 кВ при длительности импульса 25 с. Возможен вариант работы исключительно тиристорных преобразовательных модулей с ограничением максимального уровня напряженности тороидального поля установки JET [12].

Так же, как и обмотки тороидального поля, обмотки центрального соленоида токамаков могут быть выполнены как в целостном исполнении, так и в секционированном. В зависимости от конструктивного исполнения обмотки источник питания реализуется либо в виде единого блока, либо требуется его разделение на отдельные блоки, питающие каждую свою индивидуальную секцию.

Основными требованиями и характеристиками источников питания обмоток CS являются: минимизация пульсаций напряжения на выходе, относительно высокая энергоемкость оборудования (импульсы тока в обмотках CS достигают значений в 100 кА и более), максимально возможное, согласованное с сценарием изменения тока и параметрами изоляции обмотки напряжение на выходе в целях

создания требуемой величины производной изменения тока в обмотке (создание требуемой для пробоя рабочего газа напряженности вихревого электромагнитного поля), работа источника питания в четырех- квадрантном режиме с целью обеспечения реверса тока в обмотке (перемагничивание для использования полного запаса магнитного потока обмотки), а также минимизация (или полное исключение) токовой паузы в момент реверса в связи с чувствительностью плазмы и её времени жизни к непрерывности полоидального магнитного потока в момент инициации разряда, подъема тока и омического нагрева плазмы [8, 9, 10, 15].

Требования к быстродействию источников питания обмотки CS относительно не велико, тем не менее сложность сценария изменения тока в этих обмотках требует применения исключительно управляемых (тиристоры IGCT) или полууправляемых (тиристоры SCR) элементов в составе их преобразовательного комплекса.

Источники питания обмоток CS установок – ITER, EAST, T-15, DTT [7, 8, 9, 10, 15, 16] реализованы на базе AC/DC преобразователей, подключенных к понижающим трансформаторам, запитанным непосредственно от сети, JT-60SA использует комбинированное подключение источника питания с использованием мотор-генератора [14]. AC/DC преобразователи построены по мостовой 6-ти пульсной схеме выпрямления на тиристорах типа SCR. Мостовые схемы питаются от разноименных обмоток трансформаторов с фазовым сдвигом напряжений в 30 эл. град.

В настоящее время работа источников питания обмотки центрального соленоида в 4-х квадрантном режиме в основном достигается с использованием встречно-направленных комплектов тиристорных преобразователей. Данное решение характерно для установок ITER, EAST, DTT, JT-60SA [7, 9, 10, 14, 15] и отображено на рисунке 1.5.

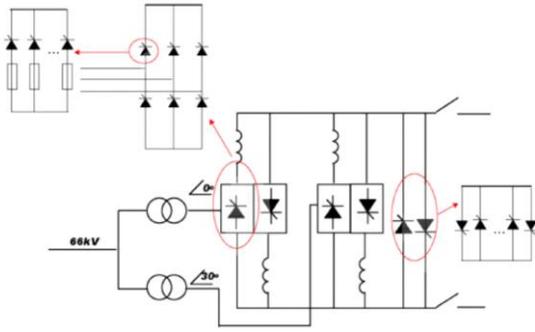


Рисунок 1.5 – Топология источника питания обмотки центрального соленоида и полоидальных обмоток установки ITER [7]

центрального соленоида установок T-15 и JET [8, 12]. Схема реверсора установки T-15 отображена на рисунке 1.6.

Реверсор в источнике питания обмотки центрального соленоида установки T-15 представляет собой электромеханическую схему, позволяющую менять направление тока в обмотке, посредством переключения 4-х механических коммутаторов (S1-S4). Для минимизации времени переключения каждый механический коммутатор шунтирован тиристорным ключом.

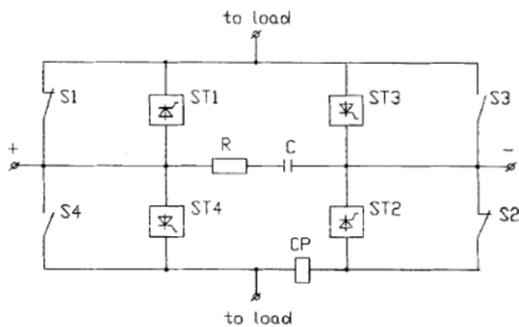


Рисунок 1.6 – Схема реверсора источника питания обмотки центрального соленоида установки T-15 [8]

электромеханические коммутаторы. В момент размыкания комплекта коммутаторов, проводящих ток в «прямом» направлении при помощи цепей с предварительно заряженными конденсаторами, насыщающимися дросселями и разрядниками создается искусственная токовая пауза (с целью защиты контактов

Тем не менее, возможна иная организация работы источника питания обмотки центрального соленоида в 4-х квадрантном режиме. При этом используется односторонний комплект тиристорных преобразователей и специализированное устройство изменения направления тока в обмотке (реверсор). Таким образом работают источники питания обмоток

коммутаторов (S1-S4). Для минимизации времени переключения каждый механический коммутатор шунтирован тиристорным ключом. Поскольку коммутаторы используют электромагнитный привод образуется задержка на их включение в пределах 5-10 мс. [8].

Схема реверсора источника питания обмотки CS установки JET не использует тиристорные ключи, шунтирующие

коммутаторов и создания условий для переключения). Схема реверсора установки JET позволяет изменять направление тока с паузой до 5 мс [12].

Несмотря на выгоду от упрощения преобразовательной части источника питания центрального соленоида при использовании реверсора, проектирование, внедрение и эксплуатация электромеханических реверсоров требует несоизмеримо больших трудозатрат, в связи с необходимостью реализации и эксплуатации сложного электромеханического комплекса с коммутируемыми токами до 100 кА при напряжениях до нескольких десятков киловольт. Решающим аргументом в пользу отказа от таких схем является невозможность достижения непрерывности тока при смене его направления в обмотке и хороших показателей надежности схемы в целом (в том числе и из-за неизбежной электрической эрозии контактов).

Для диаграмм изменения тока в обмотках центрального соленоида характерны этапы быстрого уменьшения значения тока, следующие за этапами предварительного намагничивания, реализуемые в целях генерации требуемого для пробоя рабочего газа уровня напряжения на обходе вакуумной камеры. С этой целью, согласно базовому сценарию разряда, ток в обмотке CS токамака КТМ изменяется с 30 до 0 кА за временной интервал примерно 0,23 с (скорость изменения тока при этом составляет около 130,4 кА/с) [1].

Необходимая на этапе пробоя рабочего газа производная изменения тока достигается генерацией требуемого для этого уровня напряжения, существенно превышающего уровни, используемые на остальных этапах разряда [1]. Для различных установок величины напряжения на обмотках CS на данном этапе доходят до нескольких десятков кВ. Разработка преобразовательного агрегата источников питания обмотки CS под уровень напряжения, необходимый на этапе уменьшения тока с высокой производной нецелесообразна и в некоторых случаях не представляется возможной. В этой связи, решением задачи может являться введение дополнительного активного (балластного) сопротивления в цепь электропитания обмотки в момент начала этапа уменьшения тока. В следствии введения в контур питания дополнительного активного сопротивления постоянная времени контура уменьшается, что ведет к существенному сокращению этапа

уменьшения тока. Балластное сопротивление рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить требуемую величину производной, вместе с этим учитывается максимальное возможное значение напряжения, которое возникает на шинах электропитания обмотки в момент ввода сопротивления в цепь электропитания [1].

Схемотехника источников питания полоидальных обмоток электромагнитной системы токамаков, отвечающих за равновесие, форму и положение плазмы практически не отличается от схемотехники источников питания обмоток центрального соленоида. Основным отличием является отсутствие в большинстве случаев необходимости секционирования данных обмоток, в следствии чего их источники питания реализуются в виде единого блока, а также отсутствие в большинстве случаев необходимости использования балластного сопротивления.

Оборудование данных источников питания является менее энергоемким по сравнению с источниками питания центрального соленоида, поскольку амплитудные значения токов в полоидальных обмотках, отвечающих за равновесие, форму и положение плазмы существенно ниже.

Основными требованиями и характеристиками источников питания полоидальных обмоток являются: минимизация пульсаций напряжения на выходе, относительно высокое быстродействие в следствии сложности сценария изменения тока в обмотке, работа источника питания в четырех-квadrантном режиме с целью обеспечения реверса тока в обмотке, а также минимизация токовой паузы в момент реверса.

Требования к быстродействию источников питания полоидальных обмоток, а также сложность сценария изменения тока в этих обмотках требует наличия исключительно управляемых или полууправляемых (тиристоры IGCT или SCR) элементов в составе их преобразовательного комплекса. Относительно редко применяются силовые IGBT транзисторы [17].

Источники питания полоидальных обмоток установок – ITER, EAST, T-15, DTT, JT-60SA [7, 8, 9, 10, 14, 15, 16] реализованы на базе AC/DC преобразователей, подключенных к понижающим трансформаторам, запитанным непосредственно от

сети и построены по аналогичной с источниками питания центрального соленоида схеме. Работа источников питания полоидальных обмоток в 4-х квадрантном режиме в основном реализуется с использованием встречно-направленных комплектов тиристорных преобразователей [7, 9, 10, 14, 15].

Обмотки быстрого управления плазмой предназначены для оперативной коррекции положения плазмы при её быстрых смещениях внутри вакуумной камеры в процессе разряда. Сценарий изменения тока в данных обмотках не может быть рассчитан заранее и корректируется в процессе разряда на основе обратных связей от физических диагностик плазмы. Оборудование данных источников питания является наименее энергоёмким по сравнению с оборудованием остальных источников питания токамака. Обмотки быстрого управления плазмой в основном реализуются в виде верхней и нижней секций, охватывающих «коридор» возможного дрейфа плазмы по вертикали.

Примером могут являться обмотки FPPC установки JT-60SA (см. рисунок 1.7), отвечающие за оперативную коррекцию вертикального смещения плазмы [18]. В установке ITER имеются аналогичные, корректирующие быстрые вертикальные смещения плазмы обмотки VS [7, 19].

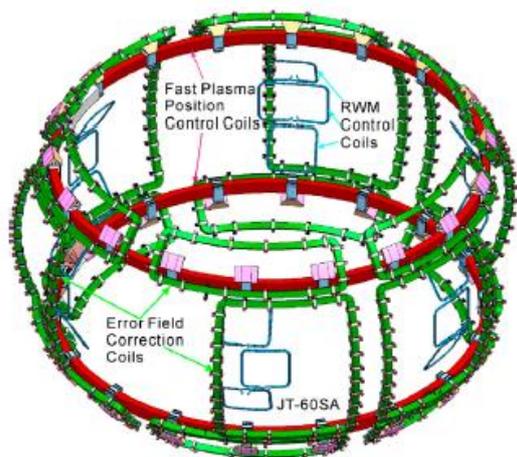


Рисунок 1.7 – Обмотки быстрого управления плазмой установки JT-60SA [18]

Основными требованиями и характеристиками источников питания обмоток быстрого управления плазмы являются: минимизация пульсаций напряжения на выходе, максимально возможное, согласованное с параметрами изоляции обмотки напряжение на выходе в целях уменьшения времени отклика системы на изменение уставки, работа источника питания в четырех-квадрантном режиме с целью обеспечения

реверса тока в обмотке, минимизация или полное исключение токовой паузы в момент реверса.

Требования к быстродействию для источников питания обмоток быстрого управления плазмы наиболее высоки в ряду источников питания обмоток полоидального поля. Топология и схемотехника при этом довольно разнообразна. Возможна реализация источника питания на базе инвертора тока, в случае чего в его схеме в основном применяются полууправляемые тиристоры SCR, либо на базе инвертора напряжения, в случае чего в большинстве случаев применяются силовые IGBT транзисторы. Реализация источника питания на IGBT транзисторах позволяет существенно повысить его быстродействие, тем не менее накладывает определенные ограничения по уровню мощности, а также существенно усложняет силовую схему и математическое обеспечение системы автоматического управления таким источником питания.

Источник питания обмоток быстрого управления плазмой FPPC установки JT-60SA выполнен на базе инвертора тока. Схема источника питания приведена на рисунке 1.8. 12-пульсные преобразователи на тиристорах типа SCR подключаются к обмоткам быстрого управления по встречно-параллельной схеме. Таким образом

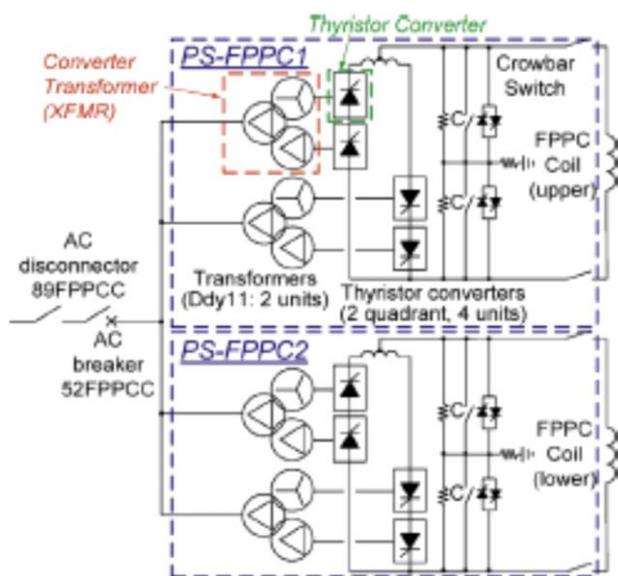


Рисунок 1.8 – Топология источника питания обмоток PS-FPPC установки JT-60SA [18]

достигается возможность работы источника питания в четырех-квadrантном режиме с согласованным алгоритмом управления, при котором в момент реверса не создается токовой паузы. Основные параметры источника питания: $U_d = \pm 1 \text{ кВ}$, $I_d = \pm 5 \text{ кА}$, время отклика схемы при ступенчатом изменении уставки - до 3 мс [18].

Источники питания обмоток быстрого управления плазмы установки ITER схемотехнически аналогичны источникам питания полоидальных обмоток этой установки, тем не менее имеют существенно меньшую установленную мощность оборудования [7, 19].

Источники питания корректирующих обмоток вертикального VFCC и горизонтального HFCC поля установки T-15 схемотехнически аналогичны источникам питания полоидальных обмоток данной установки и построены на базе инвертора тока. Реверс тока в обмотке достигается применением встречно-направленных комплектов преобразователей [8].

Источник питания обмотки быстрого управления плазмой IV (Inner Vessel) установки EAST реализован на базе инвертора напряжения, состоящего из 24 параллельно работающих H-мостовых схем на IGBT транзисторах. Основные параметры источника питания: $U = \pm 800$ В, $I = \pm 5$ кА. Время отклика на изменение уставки по напряжению – 100 мкс. Каждый из 24 модулей состоит из двух-обмоточного преобразовательного трансформатора, AC/DC преобразователя, построенного на диодах, емкостного фильтра и IGBT чоппера с балластным резистором, самого инвертора напряжения и защитного крОубара. Инвертор напряжения реализуется последовательным соединением IGBT полумостов и позволяет создать три уровня модулируемого напряжения [9].

1.2.3. Схемотехника и типы применяемых преобразователей

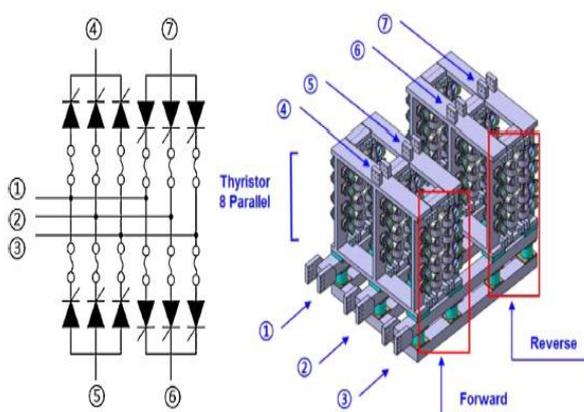
Из приведенного выше анализа топологии и схемотехники источников питания различных установок можно сделать вывод о том, что используемые схемы построения и типы преобразователей в их составе довольно разнообразны и зависят от назначения конкретного источника питания, требований, предъявляемых к нему со стороны питающей электросети, нагрузки и сценария изменения тока в контуре электропитания.

В настоящее время источники питания обмоток электромагнитной системы токамаков в основном реализуются на управляемых тиристорных AC/DC преобразователях [8, 10, 14, 20, 21, 22,], в этой связи, в данной работе статические диодные преобразователи не рассматриваются.

Преобразователи AC/DC реализуются в блочно-модульном исполнении, позволяющим осуществлять оперативную коммутацию силовых цепей и цепей

управления при монтаже (или изменении топологии) источника питания или его обслуживании. Отдельные блоки преобразователей размещаются на общей раме, позволяющей объединить их в основном в мостовые 6- и 12-пульсные схемы выпрямления, а также создавать при необходимости конфигурацию, обеспечивающую режим реверсирования тока в нагрузке [12, 20].

Принципиальная схема, 3D модель и фото AC/DC преобразователя установки ITER приведена на рисунке 1.9.



а) схема и 3D модель [22]



б) фото [20]

Рисунок 1.9 – 12-пульсный четырех-квadrантный AC/DC преобразователь установки ITER

Механическая структура AC/DC преобразователей реализуется с учетом высоких электродинамических нагрузок, возникающих при коротких замыканиях на шинах, а также с учетом возможных резонансных механических явлений на рабочих частотах преобразователя [21].

При разработке силовой и управляющей частей AC/DC преобразователей основными проблемами являются обеспечение безаварийной работы при требуемых величинах тока и напряжения на выходе. Поскольку значения токов в источниках питания обмоток токамаков достигают десятков кА, а напряжения единиц кВ – AC/DC преобразователи реализуются с применением последовательного и параллельного соединения полупроводниковых ключей.

Параллельное соединение полупроводниковых ключей в сверхмощных AC/DC преобразователях является нетривиальной задачей и реализуется посредством различных решений, позволяющих свести небаланс токов к

минимуму [20, 21, 23, 24]. Для AC/DC преобразователей источников питания обмоток установки ITER удалось добиться средневзвешенного коэффициента небаланса токов в параллельно соединенных полупроводниковых ключах в пределах 20% [21], примерно такого же коэффициента небаланса удалось добиться в AC/DC преобразователях установки JET [12].

Для выравнивания напряжений в случае последовательного соединения полупроводниковых ключей в статических и динамических режимах работы преобразователей в основном используются R- или RC- цепочки, подключаемые параллельно каждому из ключей [12].

Схемотехника AC/DC преобразователя установки JT-60SA приведена на рисунке 1.10. Для защиты полупроводниковых ключей AC/DC преобразователей от токов короткого замыкания и перегрузки используются быстродействующие предохранители, подключаемые последовательно к каждому в отдельности или к

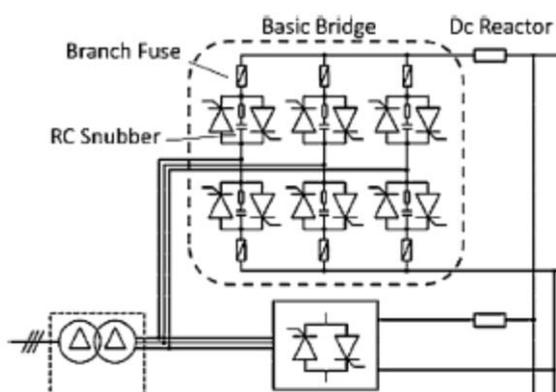


Рисунок 1.10 – Схемотехника AC/DC преобразователя установки JT-60SA [14]

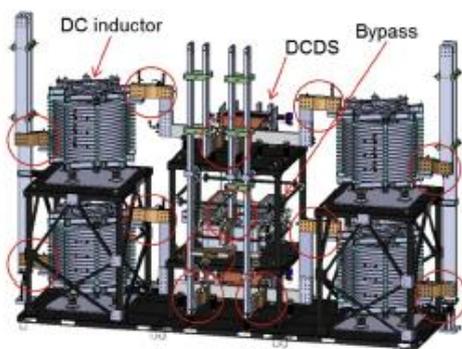
группе защищаемых ключей. В свою очередь, для защиты от коммутационных перенапряжений, а также защиты от превышения допустимой величины производной изменения напряжения (dU/dt) в основном используются защитные RC цепочки (снабберы), подключаемые параллельно к каждому в отдельности или к группе защищаемых ключей [12, 14, 22].

В целях охлаждения силовых полупроводниковых приборов в основном используют принудительное жидкостное охлаждение (как наиболее эффективный способ) [12, 14, 20, 21,], реже используется принудительное воздушное [8, 25], масляное [12] и иные виды охлаждения.

В настоящее время с целью минимизации электромагнитных помех и гальванической изоляции цепей управления, драйверы силовых

полупроводниковых приборов AC/DC преобразователей подключаются к системе импульсно-фазового управления посредством опτικο-волоконных линий [7, 9].

В схемах источников питания токамаков AC/DC преобразователи соединяются через индуктивные дроссели (уравнительные реакторы), необходимые для ограничения циркулирующих токов при совместном управлении встречно-направленными комплектами преобразователей в режиме реверса, для снижения уравнительных токов при подключении преобразователей, запитанных от обмоток трансформатора имеющих фазовые сдвиги, а также для ограничения ударных токов короткого замыкания [15, 20]. 3D модель и фото уравнительных реакторов установки ITER приведены на рисунке 1.11.



а) 3D модель [20]



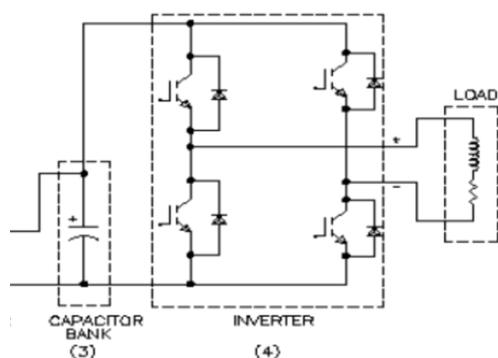
б) фото прототипов [15]

Рисунок 1.11 – Уравнительные реакторы установки ITER

Принципы расчета, выбора элементов и построения инверторов напряжения на IGBT транзисторах в некоторой степени сходны с вышеописанными принципами для преобразователей AC/DC, тем не менее имеется ряд ключевых отличий, таких как: используется иная методика расчета и выбора полупроводниковых элементов, в проблеме устранения небаланса токов на первый план выходит обеспечение строгой симметрии шин постоянного и переменного тока. Вместе с этим, классы напряжения на которых работают IGBT транзисторы и максимально допустимые токи в открытом состоянии для них существенно ниже, чем для тиристоров, что накладывает определенные ограничения на условия их применения.

На рисунке 1.12 изображена схема и фотография однофазного инвертора напряжения, построенного по H-мостовой схеме для электропитания обмотки

быстрого управления токамака SST-1. Инвертор напряжения имеет следующие параметры: ток $I = \pm 12$ кА, напряжение $U = \pm 133$ В, максимальная частота коммутации $f = 10$ кГц. Инвертор состоит из 72-х IGBT модулей, рассчитанных на ток в 300 А каждый. Дисбаланс токов в параллельно соединенных модулях в статическом режиме обеспечивается симметрией шин, а в динамическом последовательно подключенным к каждому модулю дросселем индуктивностью 4 мкГн [17].



а) схемотехника [17]



б) фото [17]

Рисунок 1.12 – Инвертор напряжения источника питания обмотки быстрого управления токамака SST-1

1.2.4. Коммутационное оборудование, используемое в источниках импульсного электропитания

Источники импульсного электропитания в звене постоянного тока используют различное коммутационное оборудование и электротехнические решения, основное предназначение которых – включение в цепь балластных сопротивлений для увеличения производной изменения тока в обмотках, а также шунтирования обмоток балластными сопротивлениями с целью их защиты от термического разрушения при потере состояния сверхпроводимости [7, 9, 14, 23, 26].

Ключи-прерыватели, использующиеся для создания высоких производных изменения тока в обмотках [27, 28] и для шунтирования обмоток при потере состояния сверхпроводимости [29, 30, 31], имеют схожую схемотехнику. Основные

требования к таким устройствам: возможность прерывания (переключения) токов величиной в несколько десятков кА при напряжении в несколько единиц кВ, минимально возможное время переключения тока (порядок нескольких мс), высокая электромеханическая прочность и надежность устройства в целом.

На рисунке 1.13 изображена принципиальная схема ключа-прерывателя постоянного тока CCU и блока балластного сопротивления SNR источников

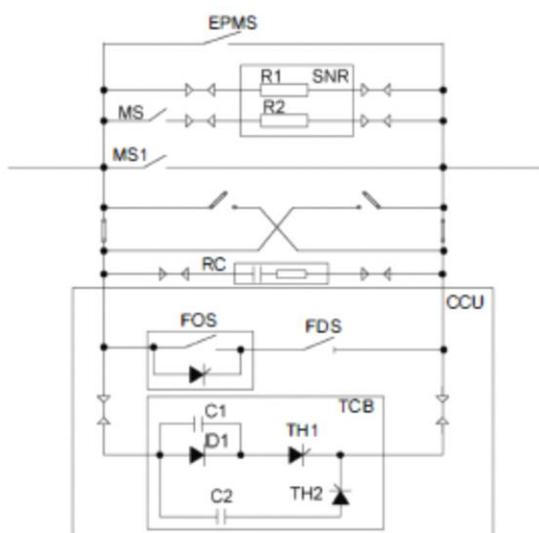


Рисунок 1.13 – Схема ключа-прерывателя постоянного тока CCU и блока балластного сопротивления SNR установки ITER [7]

питания обмотки центрального соленоида CS и обмоток полоидальных полей PF1, PF6 установки ITER. Схема состоит из следующих комплектующих: блок коммутации тока CCU (Current Commutation Unit), в составе которого находятся электромеханические ключи FOS и FDS (Fast Open Switch и Fast Disconnect Switch), тиристорные прерыватели тока TCB (Thyristor Circuit Breakers) - соединенные параллельно с блоком балластных сопротивлений R1 SNR (Switching Network Resistor), балластное сопротивление R2, подключаемое в параллель сопротивлению R1 посредством электромеханического ключа MS (Make Switch), электромеханический ключ MS1 и резервирующий его пирозлектрический ключ EPMS (Explosively-actuated Protective Make Switch) [30, 32] - подключаемые параллельно всей схеме, устройство для смены полярности протекающего тока и RC снаббер, предназначенный для защиты от перенапряжений при быстропротекающих процессах коммутации тока [27].

Необходимый номинал балластного сопротивления выбирается посредством коммутации шинных перемычек, соединяющих отдельные секции сопротивления. До реализации плазменного разряда ключи EPMS, MS и MS1 находятся в открытом состоянии, блок CCU (FOS и FDS) закрыт. Процесс коммутации тока начинается с

следующих комплектующих: блок коммутации тока CCU (Current Commutation Unit), в составе которого находятся электромеханические ключи FOS и FDS (Fast Open Switch и Fast Disconnect Switch), тиристорные прерыватели тока TCB (Thyristor Circuit Breakers) - соединенные параллельно с блоком балластных сопротивлений R1 SNR (Switching Network Resistor), балластное сопротивление R2, подключаемое в параллель сопротивлению R1 посредством электромеханического ключа MS (Make Switch), электромеханический ключ MS1 и

открытия механических контактов ключа FOS, после чего ток начинает протекать через низковольтную тиристорную группу TH. При включении тиристорного ключа TH1 сборки TCB, происходит разряд предварительно заряженного конденсатора C1 что вызывает перекоммутацию тока на TH1 и создание искусственной токовой паузы в тиристорной группе FOS и ключе FDS. Таким образом достигается отключение электромеханического ключа FDS без значительной эрозии контактов. Отключение FDS изолирует FOS от высокого напряжения в 8.5 кВ, возникающего на сборке FOS-FDS в конце процесса переключения. Следующим включается тиристорный ключ TH2, через который разряжается конденсатор C2, что вызывает прерывание тока в TH1 и его перекоммутацию на балластное сопротивление SNR.

Согласно диаграмме, приведенной в [27] полное время переключения тока до 45 кА при напряжении 8.5 кВ на балластное сопротивление для источников питания установки ITER, составляет около 5,75 мс.

В SNU (Switch Network Unit) источника питания установки JT-60SA основной ток, создающий предварительное намагничивание секции центрального соленоида, протекает через электромеханический ключ BPS. Переключение тока происходит при отключении BPS, с предварительной перекоммутацией тока на тиристорную сборку SCB. Данный ключ-прерыватель способен прерывать токи до 20 кА при напряжении 5 кВ с BPS на R1 за время порядка 8,5 мс [28].

Основное отличие от аналогичных устройств – использование в данной схеме полностью управляемых тиристоров IGCT. С использованием IGCT схема прерывателя тока существенно упрощается, уменьшается время, необходимое на переключение тока, тем не менее стоимость данных полупроводниковых приборов существенно выше тиристоров SCR, вместе с этим данный тип приборов имеет существенно большие потери во включенном состоянии и худшую перегрузочную характеристику по сравнению с тиристорами SCR (тем более в сравнении с электромеханическими коммутационными аппаратами).

Наряду с ключами-прерывателями, предназначенными для защиты обмоток токамаков от потери состояния сверхпроводимости [26, 29, 31] в составе

источников питания электромагнитной системы токамаков используются ключи-короткозамыкатели (кrouбары). Данный тип устройств предназначен для защиты преобразовательного оборудования и обмоток токамаков от перенапряжений в аварийных ситуациях, связанных с невозможностью вывода тока из обмоток штатными средствами.

1.2.5. Системы и алгоритмы управления, способы оперативной диагностики и противоаварийной защиты источников электропитания

Система управления источниками импульсного электропитания обмоток электромагнитной системы установок типа токамак является частью общей системы автоматизации установки. Данная система обладает широкой степенью интеграции со всеми остальными системами и отвечает за реализацию необходимых сценариев тока и напряжения для обмоток электромагнитной системы, диагностику и безаварийную эксплуатацию силового электрооборудования системы импульсного электропитания.

Учитывая скорости протекания процессов в системе импульсного электропитания установок токамак, количество контролируемых параметров, требуемую точность реализации сценариев тока и напряжения, установленные мощности силового электрооборудования и ограничения, накладываемые питающей сетью - система управления источниками импульсного электропитания должна обладать существенным быстродействием, высокой производительностью, высокой надежностью и помехозащищенностью, а также требуемой метрологической точностью измерений.

Для каждой отдельной установки типа токамак задача создания системы импульсного электропитания, как и эффективной системы её управления решается различными способами. Учитывая специфику работы системы импульсного электропитания - типового, унифицированного решения не существует.

Для установки ITER характерно разделение системы автоматизации проведения экспериментов на 2 уровня. Верхний уровень, отвечающий за

интеграцию всех подсистем автоматизации и обеспечивающий координацию их работы представлен системой CODAC (COntrol, Data Access and Communication). Данная система обеспечивает управление работой как относительно медленных технологических подсистем, таких как подсистемы: вакуумной откачки, криогенная подсистема, подсистема охлаждения, так и подсистем с быстрым циклом управления таких как подсистема управления плазмой, устройства сбора данных с физических диагностик комплекса, а также подсистема управления источниками импульсного электропитания. Относительно медленные подсистемы автоматизации технологических систем используют в своем составе программируемые логические контроллеры Siemens Simatic S7, тогда как в быстрых подсистемах автоматизации используются различные нестандартные специализированные решения [33].

Учитывая большое количество различных подсистем, поставляемых различными разработчиками и изготовителями, существенное значение уделено процессу их интеграции. Операционная система на базе которой реализуется подсистема CODAC это Red Hat Enterprise Linux, основанная на технологии open source (т.е. с открытым программным кодом) и работающая в режиме реального времени [34].

Системы блокировок и системы безопасности физически отделены от системы CODAC и эксплуатируются в независимом режиме. Все подсистемы автоматизации синхронизированы при помощи сети TCN (Time Communication Network) в соответствии с стандартом IEEE 1588, при этом быстрые подсистемы автоматизации и сбора данных с физических диагностик осуществляют синхронизацию с использованием сети SDN (Synchronous Data bus Network) использующую несущую частоту сигнала килогерцового диапазона.

Человеко-машинный интерфейс реализован посредством подсистемы CSS (Control System Studio), базирующейся на мультиплатформенном коде Java. Данная система представляет собой интерфейс между операторами и оборудованием и позволяет осуществлять непрерывный контроль и управление протекающими процессами, осуществлять сбор и архивирование данных, выводить операторам

контекстную помощь, реализовать аварийную и предупредительную сигнализацию и т.п.

Подсистема управления источниками импульсного электропитания установки ITER управляет силовым электрооборудованием с установленной мощностью до 2 ГВА, при этом осуществляет следующие функции:

- для источника питания обмотки тороидального поля – управление в квазистационарном режиме;
- для источников питания обмоток полоидальных полей – управление в режиме реального времени, инициация плазменного разряда, контроль положения и формы плазмы;
- для источников питания обмоток быстрого управления – контроль и коррекция в режиме реального времени быстрых смещений плазмы.

Для упрощения процесса интеграции локальных систем управления силового электрооборудования, поставляемого различными поставщиками, используется система MCS (Master Control System), включающая в себя:

- подсистему PIS (Plant Interlock System), отвечающую за координацию локальных контроллеров оперативных блокировок, связь и взаимодействие с центральной системой блокировок CIS (Central Interlock System), а также с иными исполнительными механизмами защит;
- подсистему PSS (Plant Safety System), осуществляющую контроль за безопасностью персонала при работе с оборудованием, сосудами под давлением и прочими опасными узлами и агрегатами. Данная подсистема координирует работу локальных контроллеров безопасности LSC (Local Safety Controllers) и осуществляет связь и взаимодействие с центральной системой безопасности CSS (Central Safety System);
- подсистему MRC (Master Controllers), реализующую алгоритмы управления, осуществляющую связь и взаимодействие по сети SDN с другими подсистемами автоматизации и с нижестоящими локальными контроллерами источников импульсного электропитания CCR (Circuit Controllers).

Самый нижний уровень подсистемы автоматизации источников импульсного электропитания представлен устройствами LCC (Local Control Cubicles), непосредственно управляющими преобразовательным оборудованием и осуществляющими следующие функции:

- управление последовательно и параллельно соединенными преобразователями;
- реализация импульсно-фазового управления тиристорными преобразователями в целях получения требуемого сценария изменения напряжения на выходе источников питания по уставке системы управления плазмы PCS (Plasma Control System);
- контроль циркулирующих токов при реализации реверса токов в обмотках электромагнитной системы;
- обнаружение неисправностей и противоаварийная защита;
- запись аварийных событий;
- мониторинг вспомогательного электрооборудования (силовой трансформатор, коммутационные средства и т.д.).

Подсистема MRC принимает уставки от подсистемы PCS посредством сети SDN, после чего рассылает их контроллерам CCR системы импульсного электропитания через выделенную сеть GbE с задержкой при передаче данных не более 500 мкс. Цикл управления для подсистемы PCS при этом составляет 1 мс. В свою очередь подсистема управления MCS соединена с подсистемой LCC посредством сети 1 GbE (возможно подсоединение по сети 10 GbE).

Как уже сказано выше, источники питания обмоток полоидального поля и центрального соленоида установки ITER в отличии от источника питания тороидального поля испытывают циклы «заряда/разряда» при каждом плазменном разряде и контролируются подсистемой PCS в режиме реального времени. Токи и напряжения на обмотках электромагнитной системы при этом измеряются прецизионными преобразователями и передаются в PCS посредством сети SDN. Первичные преобразователи тока в обмотках электромагнитной системы реализованы с использованием эффекта Фарадея и построены на базе

оптоволоконного кабеля что дает абсолютную гальваническую изоляцию измерительных цепей и позволяет измерять токи с погрешностью не более 0,1%.

Система оперативных блокировок PIS (Plant Interlock System) преобразовательного оборудования установки ITER включает в себя локальные контроллеры блокировок LIC (Local Interlock Controller) для каждого отдельного преобразователя построенные на платформе программируемых логических контроллеров Siemens S7-400FH, объединенных в сеть по технологии PROFINET. Вместе с этим используются так называемые быстрые контроллеры LIC (Fast-LIC), построенные на базе конфигурируемых схем FPGA [34].

Учитывая мощность силового преобразовательного оборудования источников импульсного электропитания установки ITER последствия аварии могут быть катастрофичны. К возможным авариям можно отнести – короткие замыкания на шинах преобразователей, пропуск открытия тиристоров или их повреждение и т.п. В этой связи все действия, реализующие противоаварийные алгоритмы, такие как активация кроубаров, воздействие на выключатели питающего напряжения и прочее должны быть четко скоординированы. В зависимости от условий аварии реализуются различные алгоритмы по приведению системы в безопасное состояние. Аварии детектируются соответствующими первичными преобразователями в составе силовых агрегатов и посредством контроллеров LIC (Fast-LIC). Через сеть PIN (Plant Interlock Network) происходит воздействие на соответствующие противоаварийные исполнительные механизмы (после контролируемого прерывания тока плазмы системой PCS, в случае если это возможно).

Взаимодействие системы управления с силовым преобразовательным оборудованием (анализ контролируемых параметров, анализ фазы по которой осуществляется синхронизация и выдача импульсов управления на тиристоры в соответствии с принятыми алгоритмами управления) реализуются посредством специализированного устройства Alpha controller построенного на платформе DSP/FPGA [35]. Все «быстрые» аналоговые сигналы оцифровываются и передаются в FPGA Alfa Controller посредством оптико-волоконных кабелей, что

позволяет создать полную гальваническую изоляцию управляющей электроники от помех силового электрооборудования, при этом относительно медленные диагностические сигналы обрабатываются на уровне LCC.

Связка LCC и Alpha Controller осуществляет функции импульсно-фазового управления выпрямительными агрегатами, управления циркулирующими токами при реализации реверса тока в нагрузке, функции асимметричного управления в последовательно соединенных преобразователях и пр. [35].

Система автоматизации экспериментов установки KSTAR построена на базе системы EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System), представляющей собой интерфейс между разнородными подсистемами управления установкой. Структурно в системе EPICS можно выделить подсистему SCS (Supervisory Control System) на базе которой реализуются алгоритмы управления и контроля (подсистема MDC – Machine & Discharge Control), сбора, анализа и хранения данных (DMA – Data Management & Analysis) и визуализации (Visualization) параметров технологических систем токамака и данных физических диагностик, а также подсистемы оперативных блокировок Interlock [36].

Подсистема MDC осуществляет координацию и управление технологическими системами токамака KSTAR в соответствии с шестью состояниями и этапами проведения эксперимента: обслуживание, вакуумная откачка, охлаждение, предварительный ввод тока в обмотки, проведение экспериментов с плазмой и нагрев. В соответствии с вышеуказанными состояниями и этапами проведения экспериментов строится логика работы каждой подсистемы автоматизации экспериментов и подсистемы оперативных блокировок.

На стадии проведения экспериментов с плазмой активируется подсистема CCS (Central Control System) подсистемы MDC, реализующая алгоритмы управления источниками импульсного электропитания и плазменного разряда в три этапа: предварительный этап, этап плазменного разряда и заключительный этап.

На предварительном этапе разряда задаются параметры работы и синхронизации различных технологических систем токамака KSTAR (в т.ч. систем физических диагностик и нагрева плазмы), вместе с этим, подсистема управления плазмы PCS (Plasma Control System) конфигурирует контролеры источников импульсного электропитания и газонапуска. По завершению вышеуказанных подготовительных действий подсистема CCS переходит к стадии плазменного разряда. На этой стадии управление контроллерами источников импульсного питания MPS (Magnet Power Supplies) становится для подсистемы PCS возможным.

На всех этапах проведения экспериментов подсистема CCS отслеживает готовность подсистем управления источниками импульсного электропитания посредством обмена сигналами с нижестоящими управляющими контроллерами.

Современные контроллеры преобразовательного оборудования систем импульсного электропитания установок ITER, JT-60SA по приходу уставок от вышестоящих подсистем автоматизации (система управления плазмой) реализуют следующие основные функции: регулирования тока и напряжения на обмотках электромагнитной системы, импульсно-фазового управления тиристорами преобразователей, контроля значения циркулирующего тока при совместном управлении реверсивными комплектами преобразователей, контроля ограничения углов управления, контроля распределения токов и напряжений на параллельно и последовательно соединенных преобразователях, диагностика состояния преобразовательного оборудования, реализация противоаварийных алгоритмов и т.д.

В целях реализации требуемого сценария изменения тока в обмотках электромагнитной системы контроллеры преобразовательного оборудования осуществляют ПИ или ПИД регулирование токов и/или напряжений по уставкам, приходящим от системы управления плазмой. На вход регулятора подается сигнал рассогласования уставки и сигнала обратной связи по регулируемому параметру, на выходе формируется требуемое значение угла управления α (угол задержки управляющих импульсов полупроводниковых ключей относительно точек

естественной коммутации), которое в последствии преобразуется в импульсы управления преобразовательным оборудованием.

В целях минимизации потребления преобразовательным оборудованием реактивной мощности, в случае последовательного соединения преобразователей, применяется алгоритм асимметричного управления [37, 38, 39, 40].

В момент реализации реверса тока в обмотках электромагнитной системы применяется совместный или отдельный режим управления встречно-направленными комплектами тиристорных преобразователей. В случае совместного управления импульсы подаются одновременно на оба комплекта (зачастую по закону линейного согласования $\alpha_1 + \alpha_2 = 180$ эл. град.), что позволяет реверсировать ток в обмотках электромагнитной системы без паузы в зоне его перехода через ноль. Тем не менее, из-за разницы мгновенных значений напряжений встречно-направленных комплектов преобразователей - совместное управление приводит к образованию циркулирующего (уравнительного) тока, бесполезно загружающего преобразователи и питающие их трансформаторы. Отдельный режим управления лишен этого недостатка, тем не менее, при данном режиме невозможно обеспечить реверсирование тока в нагрузке без токовой паузы, что может быть критично для пробоя рабочего газа и роста тока плазмы в токамаке (особенно для источника питания обмотки центрального соленоида). В целях снижения значения циркулирующего тока наряду с установкой специализированных ограничительных реакторов (индуктивных дросселей) применяют алгоритмы контроля значения циркулирующего тока [19, 40].

В связи с наличием в импедансе контура питания (сеть – источник питания – обмотка электромагнитной системы токамака) существенной индуктивной составляющей - коммутация тока в преобразователях с одной тиристорной группы на другую (в порядке их вступления в работу, зависящим от схемы построения источника питания и его преобразовательных агрегатов) происходит не мгновенно, а с некоторой временной задержкой. На величину задержки также влияет величина питающего сетевого напряжения. Данную задержку необходимо учитывать в процессе импульсно-фазового управления преобразовательными агрегатами во

избежание возможных аварийных ситуаций (т.н. опрокидывание инвертора) [19, 41].

С целью безаварийной эксплуатации преобразовательного оборудования в режиме инвертирования применяется алгоритм ограничения максимального угла управления - α_{MAX} , зависящего от величины питающего напряжения электрической сети - U_{RMS} , величины индуктивной составляющей импеданса контура питания - L_S и величины значения тока в нагрузке - I_{MAX} .

Поскольку источники импульсного питания обмоток электромагнитной системы установок токамак зачастую содержат довольно большое количество преобразователей, соединенных параллельно и/или последовательно – большое значение для предотвращения аварийных ситуаций и минимизации их последствий имеет контроль равномерности распределения тока по параллельно соединенным преобразователям и напряжения на преобразователях, соединенных последовательно [13, 42].

К основным способам диагностики, позволяющим оценить техническое состояние полупроводниковой преобразовательной техники можно отнести тестовый и функциональный способы. Тестовый способ обременен необходимостью применения специализированного генератора сигнала, который подключается к определенным узлам силовой цепи диагностируемого устройства. В связи с необходимостью выполнения манипуляций по подключению генератора данный способ не применим для оперативной диагностики оборудования во время его непосредственной эксплуатации [43].

К методам функционального диагностирования можно отнести спектральный анализ [44, 45], спектрально-временной анализ [44], фазный метод [46] и метод прямых измерений, основанный на анализе параметров, полученных от датчиков, подключенных непосредственно к полупроводниковому прибору. Полученные кривые мгновенных значений контролируемых параметров используются для поиска различными алгоритмами мест отказа в работе преобразователя. Метод прямых измерений позволяет оперативно производить диагностику состояния каждого отдельного полупроводникового ключа

непосредственно в процессе работы преобразовательного оборудования, при этом вычислительные мощности контроллеров системы управления используются наиболее рационально из-за отсутствия необходимости реализации сложных математических вычислений по косвенным электротехническим параметрам в работе преобразовательного оборудования.

В зависимости от текущей стадии проведения эксперимента (до или после реализации предварительного намагничивания обмоток электромагнитной системы, до или после стадии инициации разряда), в зависимости от тяжести аварии и её последствий - система управления преобразовательным оборудованием должна оптимальным образом реализовать соответствующие противоаварийные алгоритмы и алгоритмы по приведению преобразовательного и основного технологического оборудования в безопасное состояние [8, 12]. Вопросы диагностики оборудования и реализации противоаварийных алгоритмов в связи с уникальными особенностями построения и составом преобразовательного оборудования решаются для каждой отдельной установки типа токамак сугубо индивидуально.

Принимая во внимание требуемую величину установленной мощности оборудования системы импульсного электропитания, сложность электротехнических процессов, протекающих в контуре электропитания обмоток ЭМС КТМ, финансовую стоимость оборудования системы в целом, сложность и уникальность технических и алгоритмических решений, применяемых при создании систем импульсного электропитания и их систем управления для различных токамаков - становится очевидной необходимостью применения методов компьютерного моделирования на этапе проведения исследований, разработки и внедрения системы импульсного электропитания, соответствующей системы цифрового управления и противоаварийной защиты токамака КТМ. С этой целью необходимо реализовать соответствующие электротехнические расчеты, оптимизировать схемы преобразовательного оборудования как исполнительного механизма с точки зрения повышения эффективности управления и диагностики, подготовить необходимые для моделирования данные, отработать критичные с

точки зрения управления и достижимости требуемых параметров электротехнические решения на модели.

В результате моделирования будут безопасно, без использования реального электротехнического оборудования верифицированы разрабатываемые алгоритмы управления и противоаварийной защиты, проанализированы режимы работы электротехнического оборудования, осуществлен синтез и верификация регуляторов напряжения системы цифрового управления источниками импульсного электропитания токамака КТМ.

1.3 Выводы по главе

Учитывая перспективы развития термоядерной энергетики - необходимость создания эффективных систем импульсного электропитания и их систем управления, как исполнительных механизмов системы управления плазмой для термоядерных реакторов будущего не вызывает сомнений.

Сложность в разработке, исследовании и внедрении таких систем состоит в отсутствии стандартных (типовых) промышленных решений. Необходимо учитывать множество факторов, таких как: требуемые параметры проведения эксперимента, характеристики электромагнитной системы установки и ограничения с её стороны, требования со стороны поставщиков электроэнергии, необходимость гибкой подстройки системы при изменении базового сценария плазменного разряда, надежность и безаварийность системы в целом, требования к безопасности проведения экспериментов и многие другие. Каждая отдельно взятая система импульсного электропитания уникальна и служит решению задач конкретной электрофизической установки. Исследования, направленные на разработку, внедрение и развитие технического, математического и информационного обеспечения систем импульсного электропитания и их систем управления призваны повысить эффективность проведения экспериментов на установках управляемого термоядерного синтеза, снизить аварийность и повысить надежность дорогостоящего оборудования систем электропитания, повысить безопасность проведения экспериментов, а также сократить время на локализацию повреждений и ликвидацию последствий возможных аварийных ситуаций.

Принимая во внимание уникальность технических и алгоритмических решений при создании систем импульсного электропитания и их систем управления для установок типа токамак, величину установленной мощности электротехнического оборудования, сложность процессов протекающих в контуре электропитания, финансовую стоимость оборудования - представляется необходимым применение методов аналитического и имитационного компьютерного моделирования на этапе проведения исследований, разработки и

внедрения СИЭП, её системы управления и противоаварийной защиты для токамака КТМ [5].

Резюмируя основные результаты исследований, представленных в первой главе, необходимо отметить, что в ней:

1. Проведен анализ объекта управления, электромагнитной системы токамака КТМ, а также системы её электропитания, как исполнительного механизма системы управления плазмой. Рассчитаны основные электротехнические параметры обмоток электромагнитной системы. Проанализированы требования к системе электропитания токамака КТМ со стороны базового сценария плазменного разряда. Произведена реконструкция сценариев изменения мощности в контуре электропитания;

2. Проанализированы основные проблемы, схемотехнические и алгоритмические решения при создании систем импульсного электропитания и их систем управления для установок типа токамак. Определена необходимость в разработке нестандартных образцов электротехнического оборудования, удовлетворяющего условиям компоновки систем питания конкретных установок. Выявлены положительные и отрицательные стороны отдельных решений при создании таких систем, в частности:

- при наличии возможности приоритетно подключение СИЭП токамаков напрямую к питающей сети (КПД промежуточных накопителей составляет приблизительно 45-60%, усложняется задача внедрения и эксплуатации энергокомплекса);

- пульсации напряжения на выходе ИП максимально снижаются (в основном используются 12-пульсные схемы выпрямления). Реверс тока в обмотках полоидальных полей целесообразно реализовывать без использования электромеханических схем. ИП обмоток быстрого управления в основном реализуются на базе быстродействующих полностью управляемых СПП;

- специализированные AC/DC преобразователи в основном реализуются в блочно-модульном исполнении на СПП типа SCR. Приоритетна система жидкостного охлаждения. Обозначена необходимость решения проблемы деления

токов в параллельно соединенных СПП AC/DC преобразователей и их оперативной диагностики;

• в СИЭП токамаков существуют различные задачи, решением которых является создание коммутационных устройств для прерывания постоянных токов большой величины. Обозначена необходимость решения проблемы прерывания постоянного тока 30 кА в ИП обмотки CS токамака КТМ с целью включения в контур электропитания балластного сопротивления. При этом поставлена задача ключ-прерыватель реализовать на базе СПП без использования электромеханических схем;

• приоритетно использование современных, распределенных программно-аппаратных комплексов и гибкого программного обеспечения в системах автоматизации и управления ИП установок типа токамак. Определена необходимость разработки специализированных алгоритмов управления и противоаварийной защиты в каждом конкретном случае. Выявлено отсутствие комплексного подхода при внедрении СПЗ подобных энергокомплексов.

3. Определены основные направления и методы исследований, а также подход к разработке требований к системе импульсного электропитания токамака КТМ, как к исполнительному механизму системы управления плазмой, с целью обеспечения для него необходимых статических и динамических характеристик. Учтены диапазоны и скорости изменения токов в обмотках электромагнитной системы КТМ и требуемые для этого диапазоны изменения напряжений для отдельных источников питания КТМ;

4. Обоснована необходимость подготовки исходных данных и создания компьютерной аналитической модели электроэнергетического комплекса токамака КТМ на этапе исследования, разработки и внедрения системы импульсного электропитания, её системы управления и противоаварийной защиты.

Глава 2. Разработка и оптимизация для целей управления и диагностики системы импульсного электропитания токамака КТМ. Подготовка исходных данных для аналитического компьютерного моделирования

2.1. Формулировка общих требований к системе импульсного электропитания токамака КТМ

Основные требования к электротехническому комплексу токамака КТМ, как к исполнительному механизму системы управления плазмой сформулированы в результате анализа электротехнических характеристик обмоток ЭМС, параметров и ограничений, накладываемых питающей электросетью, базового сценария плазменного разряда для установки КТМ, а также общемирового опыта проектирования и внедрения управляемых систем импульсного электропитания токамаков [5, 47]. В общем виде требования сформулированы следующим образом:

1. Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения источников импульсного электропитания должен быть максимально снижен, в связи с его существенным влиянием на результаты измерений параметров плазмы в ходе проведения эксперимента. В этой связи все источники импульсного электропитания токамака КТМ реализуются по 12-фазной (12-пульсной) схеме выпрямления. Вместе с этим, повышение пульсности ИП значительно снизит искажения, вносимые источниками питания в цепь переменного тока в качестве высших гармонических составляющих [47].

2. В целях удобства комплектации, монтажа и обслуживания ИП должны иметь модульную структуру. В этой связи, в качестве модулей выделяются отдельные тиристорные управляемые 6-пульсные мостовые выпрямители, реализованные по схеме Ларионова [47].

3. СИЭП обмоток ЭМС токамака должна быть гибкой, обеспечивать возможность достаточно простой и быстрой реконфигурации. Данное требование связано с необходимостью варьирования в различных экспериментальных компаниях сценариев изменения тока и напряжения в обмотках [47].

4. Источники импульсного электропитания КТМ должны обеспечивать необходимый уровень напряжения для реализации требуемой производной тока в обмотках ЭМС. Данное требование обусловлено существенным влиянием напряжения ИП на такие параметры токамака как: напряжение на обходе камеры, скорость изменения тока в центральном соленоиде на стадии инициации разряда и роста тока плазмы, динамика изменения токов в обмотках полоидальных полей. Вместе с этим, наличие индуктивной связи между плазмой, элементами вакуумной камеры и обмотками полоидальных полей требует учитывать необходимость компенсации наводимых в процессе разряда ЭДС на данных элементах [47].

5. Система управления источниками импульсного электропитания КТМ должна быть реализована на основе современных микропроцессорных средств и эффективных алгоритмов управления, диагностики и противоаварийной защиты, что является определяющим условием для ускорения разработки, наладки и внедрения СИЭП токамака КТМ [47].

Помимо вышеуказанных требований к СИЭП установок типа токамак предъявляются также требования по минимизации токовой паузы при переходе тока в обмотках ЭМС через ноль в процессе плазменного разряда, минимизации потребления мощности контуром «нагрузка – преобразовательное оборудование», требования по снижению потребления бесполезной активной мощности, вызванной циркулирующими токами в узлах преобразовательного оборудования, построенного по многофазной схеме выпрямления, по стабильности поддержания требуемого значения и динамики изменения тока и напряжения на обмотках ЭМС.

К сожалению, на сегодняшний день типовые образцы электротехнических комплектующих и преобразовательного оборудования, пригодные для комплектации систем импульсного электропитания различных по конструктиву установок типа токамак отсутствуют. В этой связи, в каждом конкретном случае требуется разработка нестандартных, специализированных образцов под определенные поставленные задачи. Принимая во внимание мощность электротехнического оборудования и количество силовых полупроводниковых приборов, размещенных в нем, актуальной задачей является минимизация

вероятности возникновения аварий и снижение последствий их негативного воздействия. Решение данной задачи может быть достигнуто оптимизацией электротехнических характеристик и разработкой эффективной системы диагностики и управления вышеуказанным оборудованием [1, 5].

2.2. Описание структуры системы электропитания комплекса КТМ

С учетом вышеизложенных требований разработан технический проект системы внешнего и импульсного электропитания токамака КТМ [47]. Согласно проекту, система импульсного электропитания КТМ подключена напрямую к питающей сети 220 кВ Единой Энергетической Системы Республики Казахстан с использованием схемы блок-линия с одним трансформатором 220/10 кВ, мощностью 100 МВА на стороне потребителя. Использование промежуточных накопителей в данном случае оказалось нецелесообразным, поскольку приведенная к напряжению 220 кВ мощность КЗ на подстанции потребителя составляет 1,332 ГВА, при этом полная мощность, потребляемая системой импульсного электропитания токамака КТМ, согласно базовому сценарию разряда, не превышает 126 МВА. Электротехнические параметры трансформаторов систем внешнего и импульсного электропитания подобраны из расчета импульсного режима работы токамака КТМ с учетом их нагрузочных и перегрузочных характеристик [1, 5].

Структурно система импульсного электропитания установки КТМ состоит из группы согласующих (понижающих) трансформаторов 10/0,7 кВ, мощностью 31,2 МВА (на рисунке 2.1 - Т1 и Т2); трансформаторов 10/0,4 кВ, мощностью 6,3 МВА (на рисунке 2.1 - Т3...Т9); преобразовательного комплекса, включающего в себя 30 тиристорных преобразователей, установленная мощность каждого из которых составляет 15 МВт (на рисунке 2.1 - ТП); ключа-прерывателя постоянного тока на 30 кА в составе источника питания обмотки СS; инвертора напряжения, рассчитанного на мощность 3 МВт при частоте коммутации 1 кГц в составе источника питания обмоток НФС (на рисунке 2.1 - ОИ); уравнивающей и

ограничительной реакторной группы (на рисунке 2.1 - УР) и другого электротехнического оборудования. Все вышеперечисленное силовое электрооборудование подключено к головному трансформатору 220/10 кВ (на рисунке 2.1 - Т) посредством двух секций шинопроводов 10 кВ [1, 5].

Структурная схема системы импульсного электропитания токамака КТМ приведена на рисунке 2.1 [1, 5].

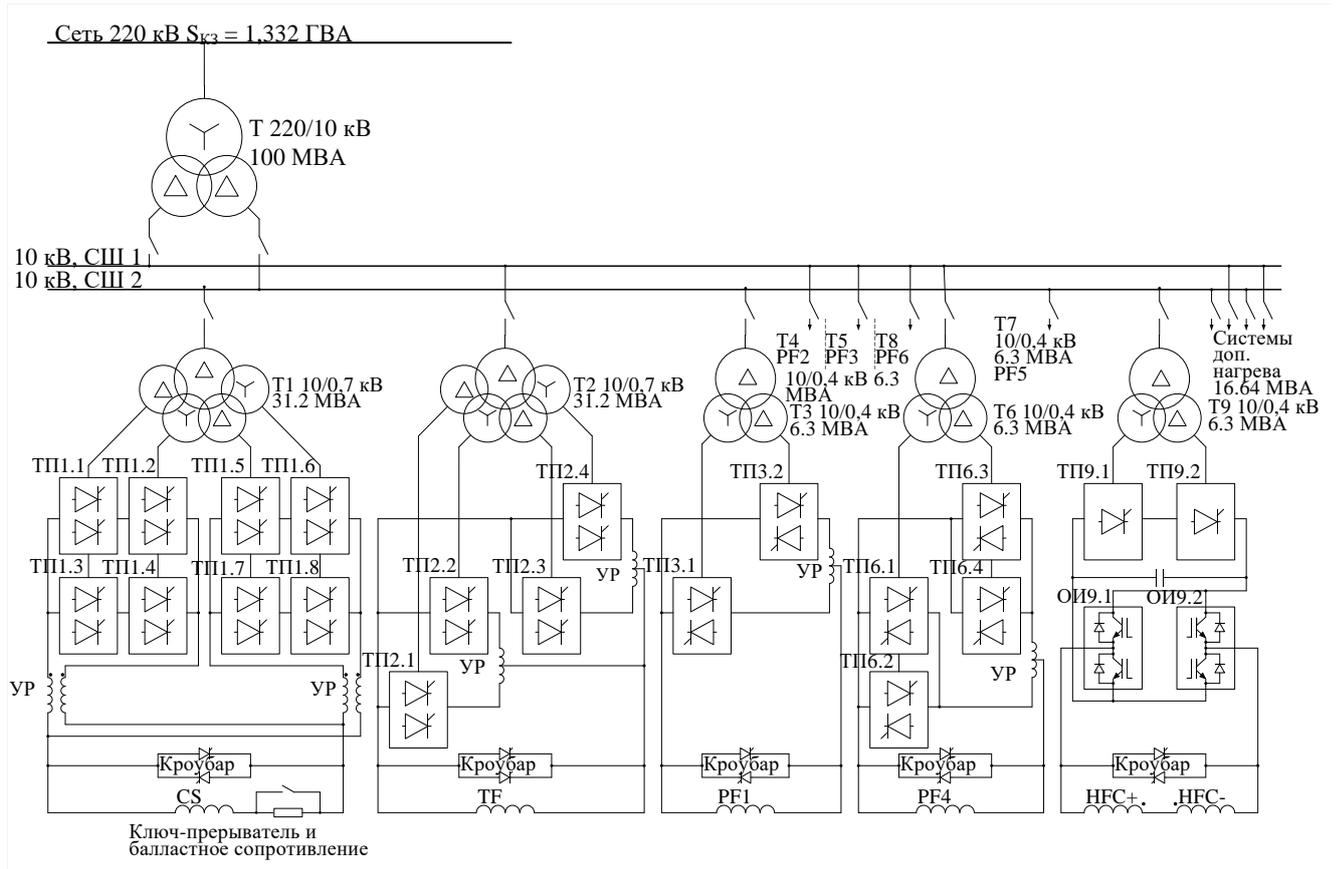


Рисунок 2.1 – Система импульсного электропитания установки КТМ [1, 5]

Электротехнические характеристики оборудования, функции и режимы работы источников питания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ приведены в Приложении Б, в таблице Б.1 [1]. Учтены диапазоны и скорости изменения токов в обмотках ЭМС КТМ и требуемые для этого диапазоны изменения напряжений для отдельных ИП КТМ.

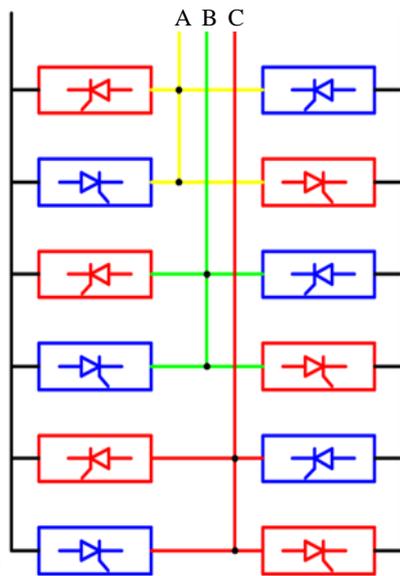
2.3. Разработка специализированного (нестандартного) электрооборудования, узлов и комплектующих. Оптимизация оборудования для целей управления и диагностики

В связи с отсутствием стандартного управляемого тиристорного преобразователя, соответствующего электротехническим требованиям СИЭП токамака КТМ, при этом соответствующего требованиям по компоновке, размещению, охлаждению, интеграции в силовое электрооборудование, а также в систему автоматизации экспериментов и систему противоаварийной защиты комплекса КТМ, разработана и внедрена основная структурная единица преобразовательного комплекса СИЭП - специализированный трехфазный мостовой тиристорный преобразователь ТП [1, 47].

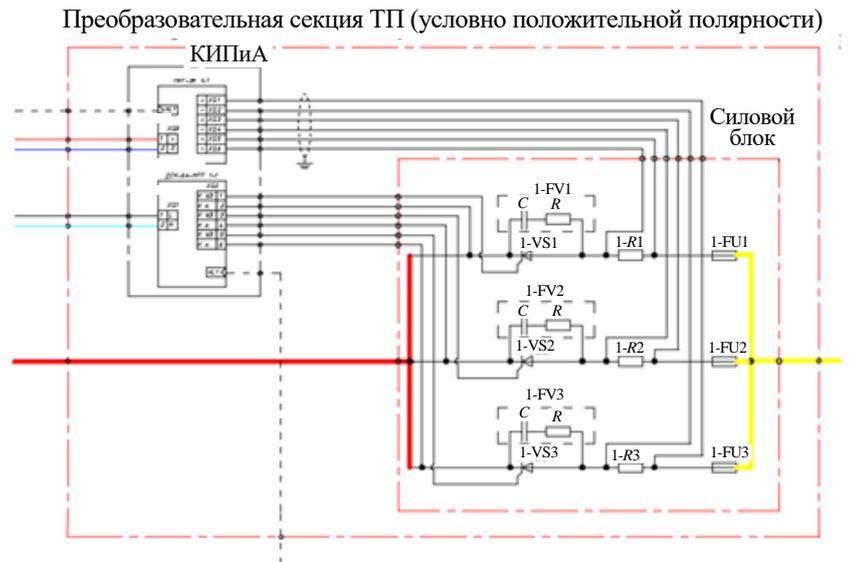
Для повышения ремонтпригодности ТП СИЭП токамака КТМ все используемые для его изготовления комплектующие унифицированы. В целях обеспечения возможности оперативной перекомпоновки преобразовательного оборудования ИП токамака КТМ при конструировании силовых блоков, устройств управления и диагностики ТП применен модульный подход [1].

Конструктивно ТП состоит из 12 силовых блоков (преобразовательных секций), включающих в себя по три параллельно подключенных тиристора SCR 1200 А/1800В, охлаждающихся деионизированной водой. Данные блоки, размещаются в отдельном электротехническом шкафу и объединяются в две независимые трехфазные мостовые схемы выпрямления. Такая конфигурация ТП обеспечивает возможность соединения его независимых мостовых схем параллельно, что характерно для ИП обмоток ТФ и СС и встречно-параллельно в целях реализации реверса тока в режиме раздельного управления в ИП обмоток PF1-PF6. Вместе с этим, каждый ТП укомплектован вводным блоком, в котором размещаются защиты от перенапряжения со стороны питающей сети, кросс-панели цепей вторичного электропитания, управления и телеметрии [1].

Компоновка ТП для реверсивной конфигурации ИП, а также принципиальная схема его преобразовательной секции представлены на рисунке 2.2.



а) схема компоновки



б) принципиальная схема преобразовательной секции

Рисунок 2.2 – Схемы ТП КТМ: — — — силовые шины; - - - оптоволоконный кабель; — — — вторичные цепи питания 24 В (+/0), — — — вторичные цепи питания 220 В (L/N) [1]

Для ТП, скомпонованного в нереверсивном варианте исполнения (ИП TF и CS) максимальный выпрямленный ток составляет 15 кА, для реверсивной компоновки (ИП PF1-PF6) – 7,5 кА соответственно. С использованием 3D-моделирования оптимизирована топология размещения комплектующих ТП, произведена трассировка силовых, управляющих и контрольно-измерительных цепей, а также элементов охлаждающей системы. На основании данных, полученных при 3D-моделировании выполнен расчет механической прочности и разработан комплект рабочей документации на силовую структуру ТП [1]. Разработка ТП осуществлялась с учетом максимально возможных токов короткого замыкания. Тепловые расчеты полупроводниковых приборов выполнены исходя из импульсного режима работы ТП с учетом двухстороннего принудительного жидкостного охлаждения, а также с использованием концепции $N + 1$, позволяющей ТП функционировать даже в случае потери одного из параллельно соединенных тиристоров в секции.

Расчет защитных (снабберных) RC цепочек, предотвращающих коммутационные перенапряжения, а также осуществляющих защиту тиристоров от

превышения скорости нарастания напряжения, равно как и быстродействующего предохранителя, предотвращающего выход из строя при перегрузке тиристора по току выполнен на основании справочных данных для используемого типа тиристора - Semikron SKT 1200/18E, а также электротехнических параметров контуров электропитания. Блок защит от перенапряжения со стороны питающей сети рассчитан исходя из условий работы ТП, а также на основании справочных данных согласующих трансформаторов СИЭП.

Нетривиальной задачей при компоновке сверхмощных преобразователей является необходимость выравнивания токов, протекающих через параллельно соединенные силовые полупроводниковые приборы. От этого зависит эффективность использования приборов, электротехнические характеристики и надёжность оборудования в целом. Данная задача может быть решена с использованием специализированных электротехнических комплектующих, а также особенностей их соединения и геометрического расположения в пространстве [1, 20, 21, 23, 24,].

Довольно оригинальное решение вышеуказанной проблемы для высокомощных AC/DC преобразователей применено при компоновке ТП СИЭП токамака КТМ. Каждый тиристор ТП подключен последовательно с кремниевым резистором (шунтом) сопротивлением 0,001 Ом, использующим жидкостное охлаждение (на рисунке 2.2 обозначены как 1-R1...R3). Это позволило эффективно распределять ток и осуществлять оперативную диагностику состояния всех тиристорov ТП методом прямого измерения тока, протекающего через них, не ухудшая динамических характеристик ТП в целом (что неизбежно при применении индуктивных делителей тока) [1].

На рисунке 2.3а показано фото с установленным электротехническим оборудованием СИЭП токамака КТМ, 2.3б фото преобразовательных секций, смонтированных в шкафу ТП [1].



а) общий вид [1]



б) фото секций ТП [1]

Рисунок 2.3 – Фотографии оборудования СИЭП токамака КТМ

По завершению монтажа преобразовательного комплекса в соответствии с ГОСТ 26567-85 были проведены электротехнические испытания, показавшие высокую эффективность в распределении токов по параллельно соединенным СПП преобразовательных секций ТП. По всем используемым в СИЭП токамака КТМ ТП коэффициент неравномерности распределения токов составил 6 % (в силовых преобразователях схожего назначения аналогичный коэффициент считается приемлемым на уровне 20% [1, 12, 20, 21]). Согласно п.п. 8.5.3 СТО РЖД 12.003-2011 данный коэффициент не должен превышать 15 %. Таким образом, достигнут результат как минимум в 2,5 раза лучший, чем требуемый по стандартам и полученный для преобразователей схожего назначения и мощности. Осциллограммы, приведенные на рисунке 2.4 отображают практически идентичные значения и формы импульсов токов, протекающих через тиристоры отдельной преобразовательной секции ТП.



Рисунок 2.4 – Осциллограммы импульсов токов, протекающих через тиристоры отдельной преобразовательной секции ТП [1]

Достижение необходимой величины производной при изменении тока в обмотке CS токамака КТМ на этапе инициации разряда и роста тока плазмы реализуется введением в этот момент сценария разряда балластного сопротивления в контур электропитания данной обмотки. Процедура по переключению тока осуществляется посредством специализированного ключа-прерывателя, разработанного на максимально возможный для обмотки CS токамака КТМ ток, величина которого составляет 30 кА. На рисунке 2.5 представлена принципиальная схема ключа-прерывателя ИП обмотки CS токамака КТМ [1].

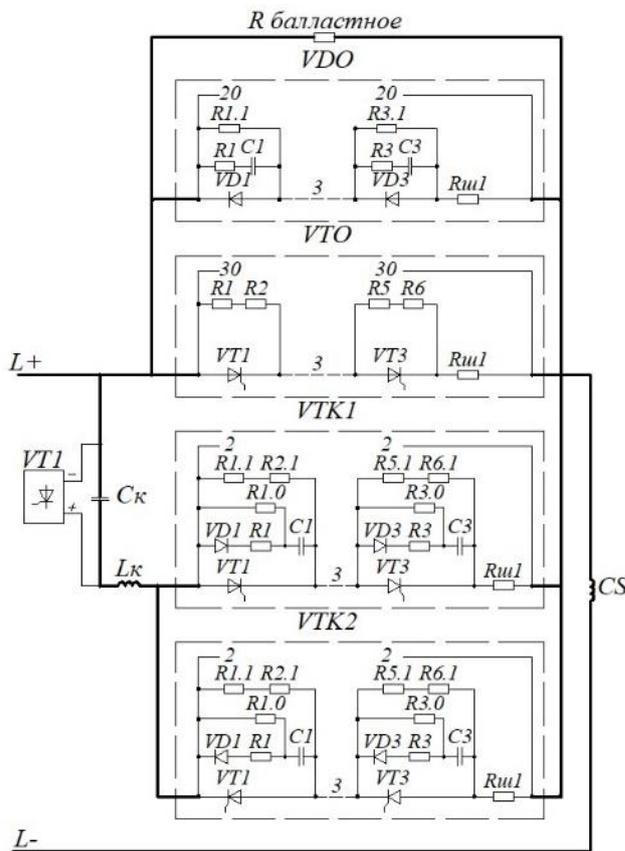


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема прерывателя постоянного тока ИП обмотки CS КТМ [1]

главную тиристорную сборку ключа-прерывателя - VTO. При старте плазменного разряда конденсаторный блок C_k , заряженный от автономного блока питания VT1, посредством включения коммутирующей тиристорной сборки VTK1 создает встречный для сборки VTO импульс тока. В этот момент, ток контура питания начинает складываться из тока ИП обмотки CS и тока, циркулирующего в контуре

Отличие от схожих решений [7, 9, 27, 28, 31] заключается в применении в качестве коммутирующих и проводящих элементов исключительно СПП (тиристоров SCR и силовых диодов) без использования электромеханических шунтирующих схем. Ключ-прерыватель работает под управлением соответствующей подсистемы управления и диагностики, построенной на базе промышленного контроллера и интегрированной в СЦУ ИП обмотки CS [1].

Сценарий изменения тока начинается с ввода в обмотку CS тока до величины уставки, при этом ток контура питания протекает через

$C_k \rightarrow L_k \rightarrow VDO$. Поскольку сборка VTO при этом оказывается под нулевым потенциалом – она закрывается и ток, протекающий в конуре питания обмотки CS, после полного разряда C_k , переключается на балластное сопротивление R_{bal} .

В процессе реверса, после прохождения тока в обмотке CS через нулевое значение, он начинает протекать через диодную сборку ключа-прерывателя VDO. Тиристорная сборка VTK2, необходима для перезарядки C_k в целях подготовки ключа-прерывателя для последующего использования без подключения блока питания VT1 [1].

По аналогии с ТП был произведен тепловой расчёт СПП, исходя из их режимов работы в схеме ключа-прерывателя. Рассчитаны необходимые защитные снабберные цепи, цепи выравнивания напряжения на последовательно соединенных СПП в статических и динамических режимах работы. В целях унификации, сокращения массогабаритных показателей, а также улучшения нагрузочной и перегрузочной характеристики ключа-прерывателя для охлаждения СПП применено принудительное двухстороннее жидкостное охлаждение. В целях повышения равномерности распределения тока по параллельно соединённым сборкам СПП (плечам), а также обеспечения возможности их непрерывной диагностики в режиме реального времени по аналогии с ТП использованы кремниевые резисторы сопротивлением $R = 0,001$ Ом с жидкостным охлаждением в каждой ветви.

Ключевые элементы схемы C_k и L_k рассчитаны исходя из паспортных данных (время выключения при определенных условиях) используемого типа тиристоров - Semikron SKT 1200/18EL3 с использованием следующего соотношения:

$t_q = (\pi - 2 \arcsin(\frac{\rho I}{U})) \times \sqrt{L_k \times C_k}$, где t_q – время выключения тиристоров, предоставляемого схемой; I – номинальный прерываемый ток; U – напряжение на C_k до переключения;

$\rho = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$ – волновое сопротивление контура.

Для проверки разработанной схемы ключа-прерывателя ИП обмотки CS токамака КТМ было принято решение реализовать его натурный макет. В целях

безопасности электротехнического оборудования штатного ИП обмотки CS в его качестве использовалась предварительно заряженная конденсаторная батарея C_{cs} [1].

Элементы макета ключа-прерывателя ИП CS токамака КТМ отображены на рисунке 2.6.

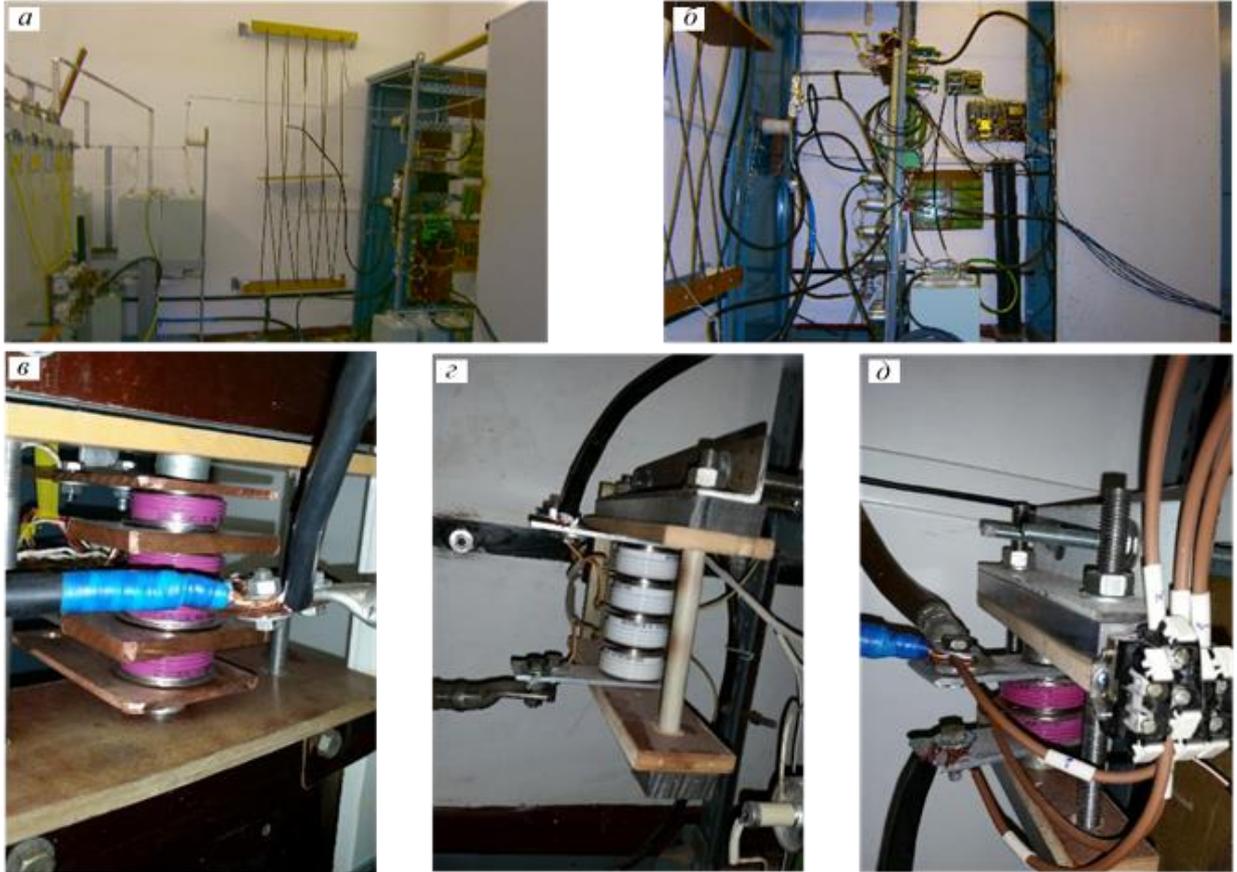


Рисунок 2.6 – Фото элементов макета ключа-прерывателя ИП обмотки CS: *а)* батарея конденсаторов C_{cs} (слева), балластное сопротивление R_{bal} (в центре); *б)* сборки полупроводниковых приборов; *в)* главная тиристорная сборка VTO; *г)* сборка VDO; *д)* коммутирующая тиристорная сборка VTK [1]

В экспериментах с макетом, ток в контуре питания обмотки CS в момент его прерывания и переключения на балластное сопротивление $R_{bal} = 0,3$ Ом составлял $I_{cs} = 5000$ А, при этом параметры C_K и L_K составляли $0,0033$ Ф и $0,00015$ Гн соответственно. В ходе экспериментов было достигнуто устойчивое прерывание и переключение тока за время порядка 3 мс. Для устройств схожего назначения в ITER и JT-60SA, эти времена составляют около 5,75 и 8,5 мс соответственно. Результаты экспериментов по прерыванию тока с использованием макета отображены на рисунке 2.7 [1].

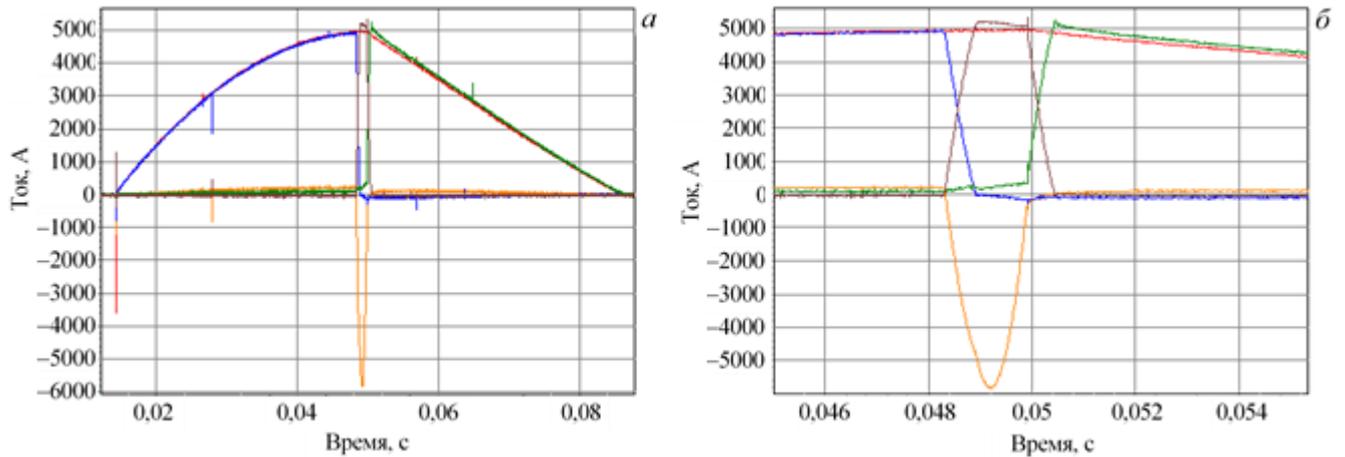


Рисунок 2.7 – Осциллограммы токов в контуре питания обмотки CS: *a)* общий вид; *б)* увеличенный фрагмент в момент переключения тока, где: — ток в обмотке CS; — ток сборки VTO; — ток батареи C_K ; — ток сборки VDO; — ток через R_{bal} [1]

В процессе макетирования был отработан механизм переключения тока, определены оптимальные характеристики ключевых элементов штатной схемы прерывателя, определен оптимальный ток в ветви C_K-L_K , позволяющий производить устойчивые переключения тока на R_{bal} . Натурное макетирование позволило безопасно для штатного электрооборудования ИП убедиться в работоспособности и эффективности предложенной схемы прерывателя. Последующие электротехнические испытания показали, что масштабирование схемы макета до штатной не влияет на время и качество переключения [1]. На рисунке 2.8 приведено фото штатного ключа-прерывателя ИП обмотки CS ЭМС токамака КТМ.



Рисунок 2.8 – Фото штатного ключа-прерывателя ИП обмотки CS

Стабилизация плазмы по вертикали в токамаке КТМ невозможна только с помощью изменения тока и напряжения в обмотках полоидального поля, обеспечиваемого соответствующим набором тиристорных источников питания из-за относительно большого значения времени

реакции используемых ТП на смену уставки по сравнению со скоростью ухода плазмы в вертикальном направлении [48]. За стабилизацию плазмы при быстрых вертикальных смещениях отвечают обмотки НФС-u/d (быстрого управления) электромагнитной системы КТМ. Требуемое быстродействие контура электропитания обеспечивается использованием в источнике питания обмоток НФС специально разработанного для КТМ однофазного мостового инвертора напряжения, построенного на высокомоощных IGBT-транзисторах.

Источник питания обмоток НФС разработан на основе требований, изложенных в научно-техническом отчете НИИЭФА им. Ефремова и НТЦ «СИНТЕЗ», за июль-октябрь и ноябрь 2006 года [3]. Конструктивно данный ИП построен на базе согласующего трех-обмоточного трансформатора ТДНП-12500/10 У1, двух ТП соединенных последовательно (12-пульсная схема выпрямления) с защитой от перенапряжения и перегрузки по току, фильтрующих емкостей в составе инвертора напряжения, самого инвертора напряжения, состыкованного со специализированным устройством сброса энергии УСЭ [48].

В целях оптимизации схемы и конструкции инвертора напряжения с точки зрения управления и диагностики, обеспечения требуемой нагрузочной характеристики и номинальных режимов работы выбор силовых полупроводниковых элементов инвертора был сделан в пользу высокомоощных интеллектуальных IGBT модулей SKiiP 2403GB172-4DUFW фирмы Semikron.

Интегрированный драйвер модуля SKiiP, обеспечивает следующий набор функций: защита от одновременного включения верхнего и нижнего транзистора полумоста (взаимная блокировка и генерация требуемого минимума «мертвого времени»), подавление помехи в управляющих сигналах, формирование управляющего импульса напряжения на затвор IGBT транзистора требуемой формы, мониторинг и защита от перенапряжений на DC шине, защита от изменения полярности на шине питания собственных нужд, защита от коротких замыканий и перегрузки, оптико-электронное и электронно-оптическое преобразование сигналов управления и диагностики [48].

В целях динамической балансировки токов, протекающих через параллельно соединенные IGBT модули при частоте коммутации в 1 кГц последовательно с каждым модулем через систему выравнивающих перемычек соединен индуктивный дроссель 10 мкГн. Статическая балансировка токов обеспечивается конструкцией и геометрией расположения силовых шин постоянного и переменного тока инвертора.

В целях обеспечения возможности вывода запасенной в обмотке НФС энергии в аварийном и штатном режимах предусмотрено специализированное устройство сброса энергии (УСЭ), представляющее собой IGBT-чоппер, нагруженный на балластное сопротивление с принудительным жидкостным охлаждением.

Величина балластного сопротивления составляет 0,4 Ом и рассчитана исходя из требований по ограничению максимально возможного напряжения на шинах постоянного тока при сбросе запасенной энергии из обмотки НФС на уровне 1 кВ. Система управления IGBT-чоппером при выводе запасенной энергии работает в режиме стабилизации напряжения на DC шине. Величина рассеиваемой балластным сопротивлением мощности составляет порядка 70 кДж.

Предварительный заряд банка фильтрующих емкостей инвертора напряжения реализуется через байпасную диодную схему, как изображено на рисунке 2.9.

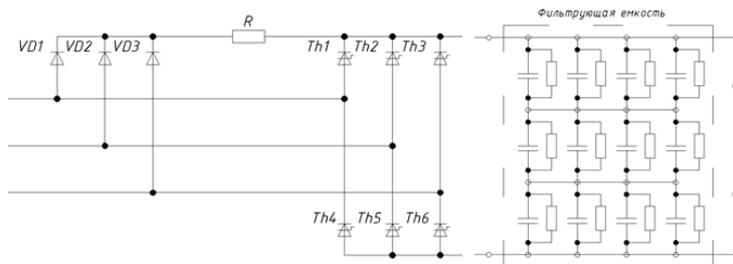


Рисунок 2.9 – Упрощенная схема предварительного заряда фильтрующих емкостей инвертора напряжения ИП обмоток НФС [48]

решение и алгоритм зарядки позволяют ограничить зарядный ток банка фильтрующих емкостей через зарядное сопротивление $R = 100$ Ом. При этом

На этапе подготовки источников питания обмоток ЭМС токамака КТМ к пуску в ТП источника питания обмоток НФС катодная группа Th1-Th3 отключена. На анодную группу Th4-Th6 СЦУ ИП обмоток НФС подаются управляющие импульсы с углом открытия $\alpha = 0$ эл. град. Такое схемотехническое

предварительный заряд фильтрующих емкостей инвертора реализуется за время равное порядка 30 с.

На рисунке 2.10 изображено фото инвертора ИП обмотки НФС ЭМС токамака КТМ, смонтированного на штатном месте размещения.



Рисунок 2.10 – Фото инвертора ИП обмотки НФС

2.4 Подготовка исходных данных для реализации аналитической модели электротехнического комплекса КТМ в среде Simulink/Simscapе системы Matlab

В целях реализации компьютерной аналитической модели системы электропитания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ в среде Simulink/Simscapе необходимо рассчитать соответствующие электротехнические параметры оборудования, входящего в состав данной системы и перевести их в относительные единицы системы Matlab.

Для всестороннего анализа, изучения поведения системы в статическом и динамическом режиме, уточнения характеристик системы - модель целесообразно разрабатывать, начиная с источника питания ограниченной мощности (его эквивалента) характеристики которого соответствуют параметрам точки подключения системы – шин ячейки расширения подстанции № 51 - 220 кВ Единой Энергетической Системы Республики Казахстан.

2.4.1 Расчет параметров точки подключения, ВЛЭП 220 кВ, шинных мостов, шинопроводов и кабельных линий

Исходя из данных, приведенных в работе ЗАО «Институт «КазНИПИЭнергопром» (Алматы, 2000 г.) «Схема внешнего электроснабжения КТМ» в составе ТЭО на строительство материаловедческого реактора КТМ [49] токи трехфазного КЗ на шинах ПС № 51, в точке подключения системы электропитания токамака КТМ составляют 4,4 кА, а полная мощность трехфазного короткого замыкания равна $S_{КЗ} = 1\ 676\ 625\ 182\ \text{ВА}$. Данная величина будет принята в качестве базовой при моделировании источника питания ограниченной мощности.

Электроэнергетическая подстанция токамака КТМ (ПС КТМ) питается от ПС № 51 посредством воздушной линии электропередач ВЛЭП 220 кВ. Учитывая длину линии – 16,6 км (что много меньше отрезка 100 – 1000 км.), а также частоту переменного тока – 50 Гц, в соответствии с [50] ВЛЭП может быть смоделирована как линия с сосредоточенными параметрами, представленная П-образной схемой замещения, либо цепью RL . В данной работе ВЛЭП 220 кВ моделируется как RL -цепь, поскольку для определения её параметров достаточно результатов опыта КЗ на стороне подстанции потребителя – ПС КТМ.

Шинные мосты, кабельные линии, шинопроводы и ошиновка оборудования электроэнергетического комплекса смоделированы также на основе схем замещения, представленных RL -цепями. Исходными данными являются данные проекта системы внешнего и импульсного электроснабжения стендового комплекса КТМ. Учтены все необходимые электротехнические и геометрические параметры элементов на основе монтажных схем, схем кабельных трасс, конструкций ошиновки, типа и марки проводников и др. Расчет параметров схем замещения выполнялся на основе методик, изложенных в [6, 51, 52, 53, 54, 55].

Конструкция магистральных шинопроводов постоянного тока СИЭП токамака КТМ представлена на рисунке 2.11.

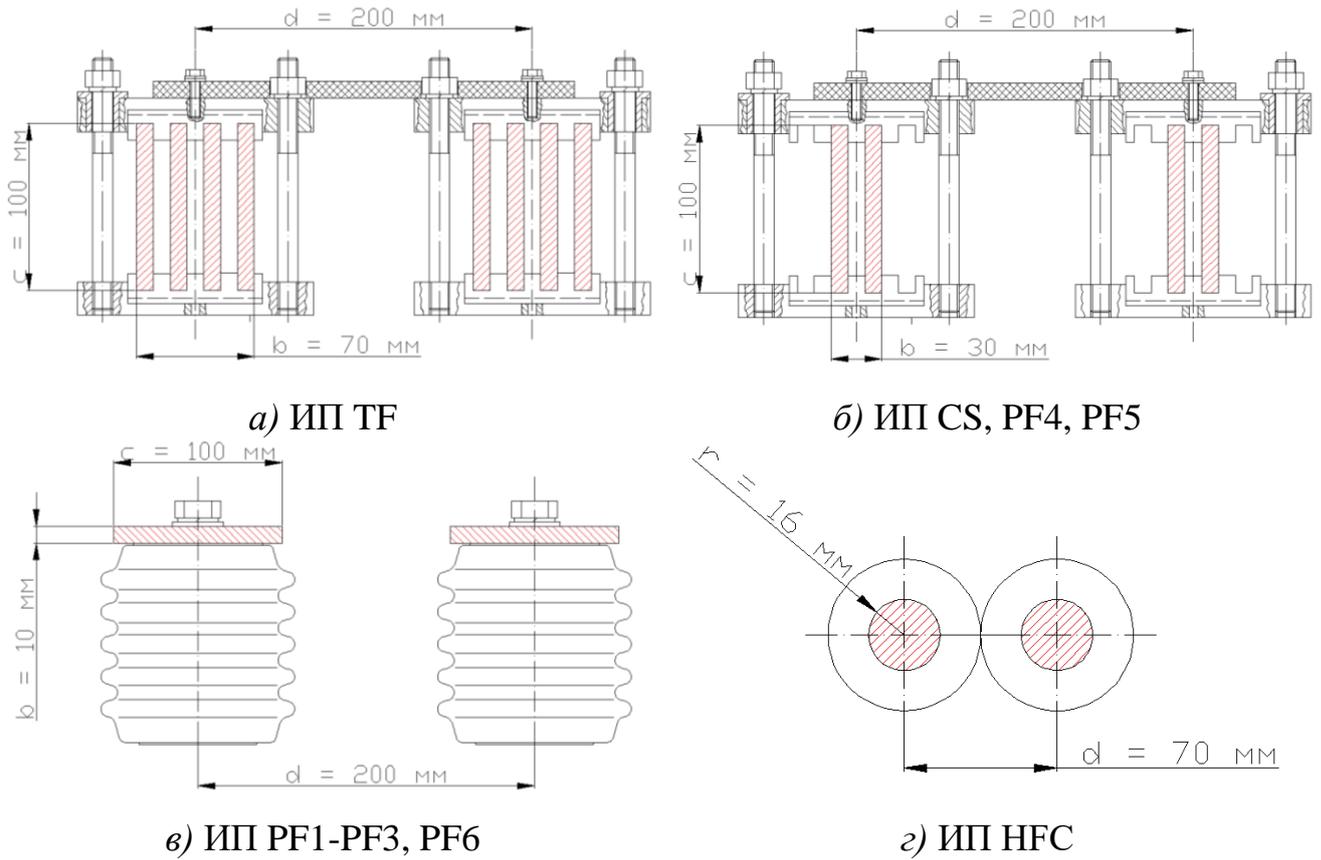


Рисунок 2.11 – Конструкция шинопроводов постоянного тока СИЭП КТМ

Активное сопротивление R (Ом) шинного моста 10 кВ, питающего ячейки закрытого распределительного устройства от головного трансформатора T_0 , определяется по формуле [54]: $R = \frac{\rho l}{S} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)]$, где: ρ – удельное сопротивление проводника (Ом·мм²/м), при температуре θ_1 (обычно принимается 20 °С), l – длина проводника (м), S – сечение проводника (мм²), α – температурный коэффициент изменения сопротивления, θ_2 – температура при которой определяется сопротивление проводника (°С).

Удельное активное сопротивление $r_{y\phi}$ (Ом/м) проводника шинного моста при $\theta_2 = \theta_1$ будет равно: $r_{y\phi} = \frac{\rho K_{\phi on}}{S}$, где $K_{\phi on}$ – коэффициент дополнительных потерь [54].

При количестве проводников шинного моста $n = 3$ - $K_{\phi on} \approx 1,6$. Активное сопротивление одной фазы шинного моста находится как: $R_{1\phi} = r_{y\phi} \times l$ (Ом).

Учитывая геометрию расположения фаз шинного моста 10 кВ (шины установлены на ребро, фазы расположены горизонтально в ряд) удельная величина

реактивного сопротивления x (Ом/км) проводника для крайних фаз шинного моста определяется, как [54]: $x_1 = x_3 = 628 \times (\ln \frac{d}{g} + 0,346) \cdot 10^{-4}$, где d – расстояние между осями фаз (см), g – среднегеометрическое расстояние площади поперечного сечения пакета шин от самого себя (см). Для прямоугольного сечения шин $g \approx 0,224 \times (b + h)$, где b – ширина проводника, h – высота проводника (см).

Для центральной фазы удельная величина реактивного сопротивления определяется как: $x_2 = 628 \times (\ln \frac{d}{g}) \cdot 10^{-4}$. Поскольку $x_1 = x_3 \approx x_2$, но $x_1 = x_3 > x_2$, принимаем $x_1 = x_3 = x_2 = 628 \times (\ln \frac{d}{g} + 0,346) \cdot 10^{-4}$ (Ом/км).

Реактивное сопротивление одной фазы шинного моста будет равно $X_{1\phi} = x_l \times l$ (Ом), где l – длина шинного моста (м), x_l – удельная величина реактивного сопротивления одной фазы (Ом/м), а индуктивность фазы будет равна $L_{1\phi} = \frac{X_{1\phi}}{2\pi f}$ (Гн), где $2\pi f$ – круговая частота переменного тока (рад/с).

В проекте кабельных линий СИЭП комплекса КТМ 10 кВ, прокладываемых от закрытого распределительного устройства до согласующих трансформаторов Т₁-Т₉, применяется кабель АПВнг-LS-20 сечениями 1х150 и 1х800 мм². Расположение токоведущих жил – три фазы, уложенные в горизонтальной плоскости. Для данного типа кабеля в [55] имеются все необходимые исходные параметры, требуемые для расчетов.

Емкость одной фазы кабельной линии определяется из следующего соотношения: $C_{1\phi} = c_l \times l$ (мкФ), где c_l – погонная емкость кабеля (мкФ/м), а l – длина линии (м). Индуктивное сопротивление одной фазы определяется из соотношения: $X_{1\phi} = x_l \times l$ (Ом), где x_l – погонное индуктивное сопротивление кабеля при расположении фаз в одной плоскости (Ом/м). Активное сопротивление одной фазы определяется как: $R_{1\phi} = r_l \times l$ (Ом), где r_l – погонное активное сопротивление кабеля при температуре проводника 20 °С (Ом/м). Индуктивность одной фазы кабельной

линии будет равна $L_{1\phi} = \frac{X_{1\phi}}{2\pi f}$ (Гн), где $2\pi f$ – круговая частота переменного тока (рад/с).

Параметры кабельных линий 0,4/0,7 кВ, питающих тиристорные преобразователи СИЭП от вентильных обмоток соответствующих согласующих трансформаторов рассчитаны аналогично.

При этом, для источника питания обмотки ТГ конфигурация и основные размеры, требуемые для расчета параметров элемента приведены на рисунке 2.11 - вариант а). Для источников питания обмоток CS, PF4 и PF5 – вариант б). Для источников питания обмоток PF1-PF3, PF6 – вариант в). Для источника питания обмотки НФС – вариант г).

Аналогично расчету параметров шинного моста 10 кВ (от головного трансформатора T_0 до ячеек закрытого распределительного устройства) активное сопротивление R (Ом) магистрального шинпровода постоянного тока определяется по формуле [54]: $R = \frac{\rho l}{S} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)]$.

Удельное активное сопротивление $r_{y\phi}$ (Ом/м) шинпровода при $\theta_2 = \theta_1$ будет равно: $r_{y\phi} = \frac{\rho K_{\text{доп}}}{S}$, где $K_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительных потерь [54]. При расчете активного сопротивления магистральных шинпроводов постоянного тока $K_{\text{доп}}$ принимается $\approx 1,5$. Активное сопротивление шинпровода находится как: $R_{\text{ш}} = r_{y\phi} \times l$ (Ом), где l – длина шинпровода (м).

Удельная (погонная) индуктивность для шинпроводов, изображенных на рисунке 2.11 варианты а) и б) определяется по формуле [6]: $L_{y\phi} = \frac{\mu_0}{\pi} (\ln \frac{d}{b+c} + \frac{3}{2} + f - \varepsilon)$ (Гн/м), где: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$ (Гн/км) – магнитная постоянная; d , b и c – геометрические параметры шинпровода (мм), f и ε – коэффициенты, приведенные в [6].

Значение удельной (погонной) индуктивности для шинпроводов, изображенных на рисунке 2.11 вариант в) определяется по формуле [6]:

$$L_{y\phi} = \frac{\mu_0}{\pi} (\ln \frac{d}{b+c} + \frac{1}{2} (\frac{1}{\beta} + 1)^2 \times \ln(1 + \beta) + \frac{1}{2} (\frac{1}{\beta} - 1)^2 \times \ln(1 - \beta)) \text{ (Гн/м)}, \beta = \frac{c}{d} \text{ (мм)}.$$

Удельную (погонную) индуктивность для шинопровода, изображенного на рисунке 2.11 вариант г) определяем по формуле [6]: $L_{y0} = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \frac{d}{r} + \frac{1}{4} \right)$ (Гн/м), где: d и r – геометрические параметры шинопровода (мм). Общая индуктивность шинопровода определяется по формуле $L_{ш} = L_{y0} \times \frac{l}{2}$ (Гн).

На рисунке 2.12 представлена схема замещения сетей 220/10/0,7/0,4 кВ переменного тока систем внешнего и импульсного электроснабжения комплекса КТМ.

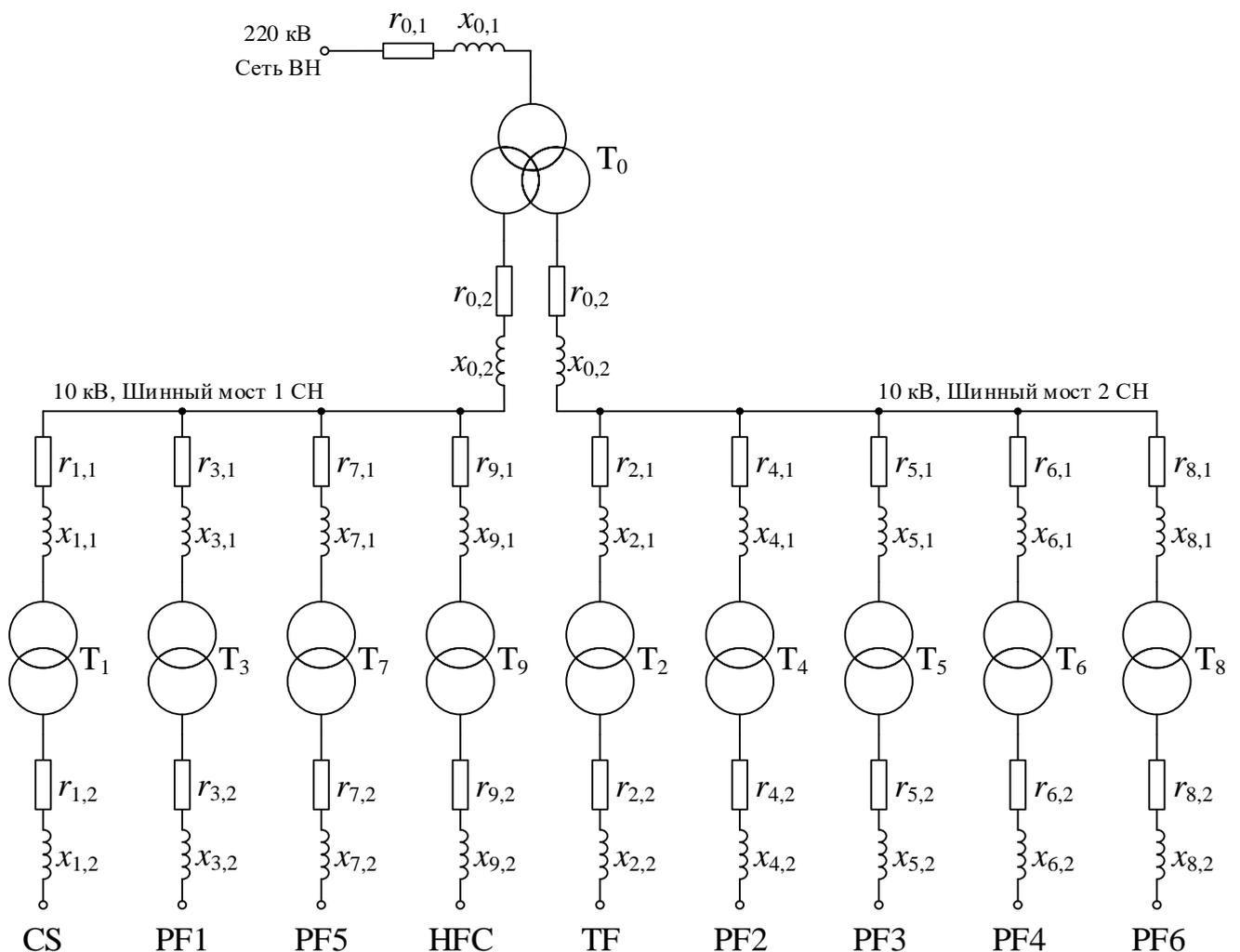


Рисунок 2.12 – Схема замещения сетей переменного тока комплекса КТМ

На рисунке 2.12 обозначены: $r_{m,1}$ и $x_{m,1}$ – активные и реактивные сопротивления линий электропитания СО трансформаторов T_m ($m=0\dots9$) систем внешнего и импульсного электропитания (о.е.); $r_{m,2}$ и $x_{m,2}$ – активные и реактивные

сопротивления линий электропитания (о.е.) нагрузки от ВО трансформаторов T_m . На схеме у каждого согласующего трансформатора СИЭП (T_1 – T_9) условно отображена одна ВО и одна линия электропитания его нагрузки.

В целях параметрирования соответствующих элементов Simulink/Simscape параметры элементов рассчитывались в относительных единицах (о.е.) [56, 57, 58], связанных с базовой величиной следующим отношением:

$$\text{Величина в о.е.} = \frac{\text{Значение величины в СИ}}{\text{Базовое значение величины}}.$$

Расчетные параметры схем замещения линий электропитания в единицах СИ и о.е. отображены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры схемы замещения сетей 220/10/0,7/0,4 кВ переменного тока комплекса КТМ

Транс.	R_1	L_1	R_2	L_2	r_1	x_1	r_2	x_2
–	МОм	мкГн	МОм	мкГн	$\times 10^{-3}$ о.е.			
T_0	2333,8	29714,9	1,309	34,2	4,4117	17,6469	1,1873	9,7453
T_1	4,404	62,293	0,872	7,11	1,3681	6,0795	47,0176	120,4380
T_2	4,588	64,889	0,306	2,4945	1,4253	6,3329	16,4992	42,2549
T_3	37,080	110,064	0,771	6,287	2,3360	2,1784	35,8673	91,8837
T_4	35,020	103,949	0,991	8,083	2,2063	2,0574	46,1019	118,1319
T_5	21,630	64,204	0,795	6,486	1,3627	1,2707	36,9838	94,7920
T_6	27,810	82,548	1,211	9,879	1,7520	1,6338	56,3364	144,3802
T_7	26,780	79,490	1,009	8,232	1,6871	1,5733	46,9392	120,3096
T_8	30,488	90,497	0,844	6,885	1,9207	1,7911	39,2634	100,6233
T_9	20,600	61,146	0,520	4,241	1,2978	1,2102	24,1907	61,9816

2.4.2 Расчет параметров трансформаторов и уравнильных реакторов

Согласующие трансформаторы системы импульсного электропитания токамака КТМ сконструированы для питания мощных преобразовательных установок (в основном предназначенных для электролизного производства). Методика расчета параметров при моделировании таких трехфазных трех- и пяти-

обмоточных трансформаторов по их паспортным данным в известных в настоящее время литературных источниках отсутствует. В основном описываются методики расчета параметров трех-обмоточных трансформаторов распределительных подстанций, имеющих в своем составе три обмотки – высшего, среднего и низшего напряжения или трансформаторов с расщепленными обмотками низшего напряжения [59, 60, 61]. При этом, в их паспортах приводятся данные различных опытов короткого замыкания для обмоток ВН, СН и НН, описанных в ГОСТ 16110-82.

Данные методики в случае необходимости расчета параметров, специализированных преобразовательных многообмоточных трансформаторов, имеющих независимые (гальванически не связанные) вентиляльные обмотки с равными уровнями напряжения и мощности не применимы. В паспортных данных для трансформаторов мощных преобразовательных установок в соответствии с ГОСТ 16772-77, а также [62] приводятся опыты – сквозного короткого замыкания U_k (%), короткого замыкания коммутации U_{kk} (%), частичного короткого замыкания $U_{кч}$ (%), короткого замыкания расщепления $U_{кр}$ (%), а также данные опытов холостого хода (ХХ).

С целью реализации Simulink/Simscapе моделей преобразовательных трансформаторов комплекса электропитания токамака КТМ в системе Matlab определены их схемы замещения (Рисунок 2.13) и соответствующие электротехнические параметры.

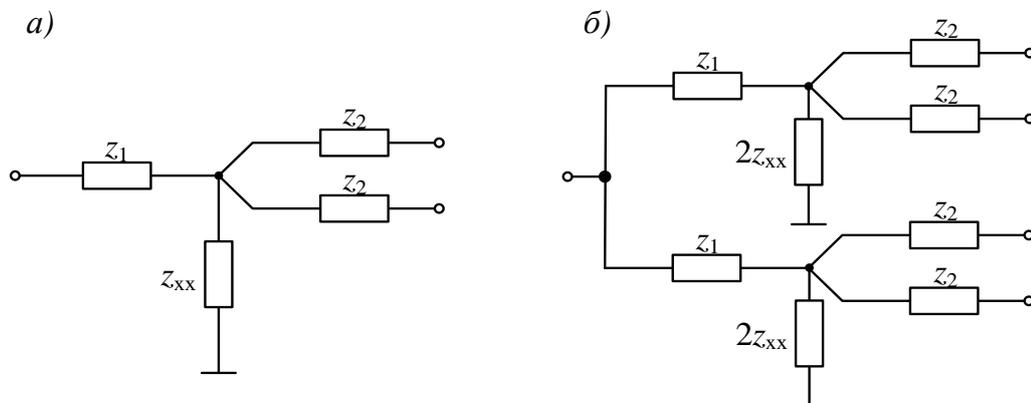


Рисунок 2.13 – Схемы замещения: а) трех-обмоточных трансформаторов; б) пяти-обмоточных трансформаторов

В целях параметрирования соответствующих элементов Simulink/Simscape параметры трансформаторов рассчитывались в относительных единицах (о.е.) [56, 57, 63]. Формулы, используемые для расчета базовых величин трансформаторов (для каждой из их обмоток) отображены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Определение базовых величин обмоток трансформаторов

Базовая величина	Обмотки соединенные в:	
	Д	У
Мощность, ВА (на фазу)	$S_{\phi} = S / 3$	
Напряжение, В	$U_{\phi} = U$	$U_{\phi} = U / \sqrt{3}$
Ток, А	$I_{\phi} = S_{\phi} / U_{\phi}$	
Импеданс, сопротивление, Ом	$Z_{\phi} = U_{\phi} / I_{\phi}$	

В таблице 2.3 отображены формулы, используемые для расчета параметров трансформаторов из данных опытов короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ) [56, 64].

Таблица 2.3 – Параметры сопротивлений КЗ и ХХ трансформаторов

Опыты	Импеданс, о.е.	Сопротивление, о.е.	Реактивность, о.е.
КЗ	$ z = \frac{\%u}{100}$	$r = \frac{P}{S}$	$x = \sqrt{ z ^2 - r^2}$
ХХ	$ z_{xx} = \frac{100}{\%i_{xx}}$	$r_{xx} = \frac{S}{P_{xx}}$	$x_{xx} = \left(\frac{1}{z_{xx}^2} + \frac{1}{r_{xx}^2} \right)^{-0.5}$

Используемые в формулах обозначения: S – номинальная мощность трансформатора (ВА); $\%u$ – напряжение КЗ (в % от номинального значения); P – мощность потерь при КЗ (Вт); r, x – активное и реактивное сопротивление КЗ (о.е.); z – полное сопротивление при КЗ, $z = r + jx$ (о.е.); $\%i_{xx}$ – ток ХХ (в % от номинального значения); P_{xx} – мощность потерь ХХ (Вт); r_{xx}, x_{xx} – активное и реактивное сопротивление ХХ (о.е.); z_{xx} – полное сопротивление ХХ, $z_{xx} = r_{xx} + jx_{xx}$ (о.е.).

В процессе определения соответствующих параметров трансформаторов учтено, что сопротивление контура намагничивания по величине намного превышает сопротивление контура КЗ т.е. $|z_{xx}| \gg |z_k|$, при этом для трех-

обмоточного трансформатора $z_{к,к}$ и $z_{к,ч}$ равны между собой. В этом случае искомые параметры схемы замещения связаны с сопротивлением контура КЗ следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} z_{к} &= z_1 + \frac{z_2}{2}, \\ z_{к,к} = z_{к,ч} &= z_1 + z_2 \quad \text{или} \quad z_{к,р} = 2z_2. \end{aligned} \quad (2.1)$$

В связи со сложностью и малоприспособностью для инженерных расчетов схем замещения пяти-обмоточных трансформаторов их схемы замещения приведены к Т-образной модели трех-обмоточного трансформатора с использованием трех-лучевой схемы замещения, приведенной на рисунке 2.13а [62]. При этом, схема замещения выбрана в зависимости от компоновки соответствующего источника питания и особенностей режимов его работы. Для трансформатора источника питания обмотки ТФ используется схема, представленная на рисунке 2.13а, и для определения его параметров справедливы соотношения (2.1). Это связано с непрерывной параллельной работой всех используемых в источнике питания тиристорных преобразователей, запитанных от полного количества вентильных обмоток данного трансформатора. В источнике питания обмотки СS пяти-обмоточный трансформатор представлен как два трех-обмоточных со схемой соединения, отображенной на рисунке 2.13б, при этом один из трансформаторов используется для запитки преобразователей, создающих в обмотке СS положительное направление тока, другой – отрицательное. В этой связи для трансформатора источника питания обмотки СS параметры схемы замещения определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} z_{к,к} &= z_1 + \frac{z_2}{2}, \\ z_{к,ч} &= z_1 + z_2. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Сопротивление контура намагничивания принято, как удвоенная величина, рассчитанного из соотношений, представленных в таблице 2.3 для опыта ХХ.

Ввиду недостатка заводских паспортных данных на используемые типы трансформаторов (в большинстве случаев присутствуют только данные по опыту сквозного КЗ, являющегося обязательным), при расчетах параметров схем

замещения по формулам (2.1) и (2.2) использованы следующие соотношения, выражающие зависимость всех типов сопротивлений при опытах КЗ, от полученного в опыте сквозного КЗ [62]:

$$z_{к,к} = k_{к} z_{к}, \quad z_{к,ч} = k_{ч} z_{к}, \quad z_{к,р} = k_{р} z_{к}, \quad k_{к} = 1 + \frac{k_{р}}{4}, \quad (2.3)$$

где $k_{к}$, $k_{ч}$ и $k_{р}$ – коэффициенты сопротивлений при КЗ коммутации, частичном КЗ и КЗ расщепления без размерности. Значения данных коэффициентов являются типовыми и определяются конструктивными особенностями и пространственным расположением обмоток для различных типов трансформаторов [62]. Принимая во внимание соотношения для опытов КЗ, указанные в таблице 2.3 и выражения (2.3),

получаем следующие зависимости: $k_{к} = \frac{\%u_{к,к}}{\%u_{к}}$, $k_{ч} = \frac{\%u_{к,ч}}{\%u_{к}}$.

Это позволяет рассчитать все необходимые типы сопротивлений используя параметры опыта сквозного КЗ требуемого трансформатора или трансформатора аналогичной мощности и серии [62]. В Приложении Б, таблице Б.2 отражены имеющиеся заводские данные на трансформаторы электротехнического комплекса КТМ, соответствующие номинальным положениям устройств ПБВ и РПН, а также рассчитанные с использованием вышеуказанных соотношений. Для трансформаторов Т₁-Т₉: U_2 – напряжение ВО, соединенных в треугольник, U_3 – соединенных в звезду. Коэффициент $k_{к,ч}$ для головного трансформатора Т₀ рассчитан исходя из имеющихся данных опыта сквозного и частичного КЗ для ТРДЦМ–100000/220У1. Коэффициенты $k_{к,к}$ и $k_{к,ч}$ для Т₁-Т₉ рассчитаны на основании $\%U_{к}$, $\%U_{кк}$ и $\%U_{кч}$, отраженных в соответствующих технических спецификациях для данных типов трансформаторов.

Расчётные значения параметров схем замещения трансформаторов, а также их сопротивлений КЗ и ХХ отражены в таблице 2.4. При этом, расчет сопротивлений сквозного КЗ ($r_{к}$ и $x_{к}$) и сопротивлений контура намагничивания ($r_{хх}$ и $x_{хх}$) реализован с использованием соотношений таблицы 2.3, а сопротивления контуров КЗ коммутации и КЗ частичного – с использованием соотношений (2.3).

Сопротивления схем замещения трансформаторов T_0 , T_2 - T_9 (головного, источников питания обмоток TF, PF и HFC, отображенных на рисунке 2.13а рассчитаны с использованием соотношений (2.1). Для схемы замещения трансформатора T_1 источника питания обмотки CS, отображенной на рисунке 2.13б применялись соотношения (2.2).

Таблица 2.4 – Параметры схем замещения трансформаторов электротехнического комплекса КТМ

Транс.	Сопротивления КЗ						Параметры схем замещения трансформаторов					
	$\times 10^{-3}$ о.е.						$\times 10^{-3}$ о.е.				о.е.	
	r_k	x_k	$r_{k,k}$	$x_{k,k}$	$r_{k,ч}$	$x_{k,ч}$	r_1	x_1	r_2	x_2	r_{xx}	x_{xx}
T_0	3,33	132,0	–	–	6,334	250,9	0,333	13,2	5,99	237,52	1634	947
T_1	6,97	108,8	7,31	114,2	12,75	199,1	1,88	29,37	10,87	169,69	1105	479
T_2	6,9	95,6	7,24	100,3	12,63	174,9	6,55	90,77	0,7	9,56	984	466
T_3	11,27	100,4	11,84	105,4	–	–	10,71	95,35	1,13	10,04	1156	668
T_4	11,17	102,4	11,73	107,5	–	–	10,61	97,27	1,12	10,24	1223	721
T_5	10,76	99,9	11,29	104,9	–	–	10,22	94,93	1,08	9,99	1167	639
T_6	10,91	100,4	11,46	105,4	–	–	10,36	95,39	1,09	10,04	1077	526
T_7	10,79	98,6	11,33	103,5	–	–	10,25	93,68	1,08	9,86	1105	631
T_8	10,99	99,4	11,54	104,3	–	–	10,44	94,42	1,1	9,94	1193	657
T_9	11,0	99,5	11,55	104,5	–	–	10,45	94,52	1,1	9,95	933	502

Схема замещения для уравнительных реакторов источников питания обмоток TF, CS и PF1-PF6 приведена на рисунке 2.14.

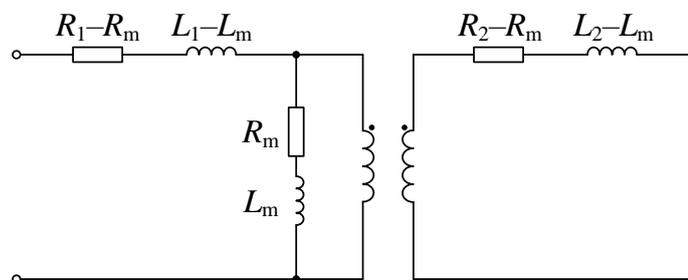


Рисунок 2.14 – Схема замещения уравнительных реакторов

Расчёт параметров схемы замещения уравнильных реакторов выполнен на основе заводских паспортных данных и данных, уточненных в результате прямых измерений.

Взаимная индуктивность ветвей реакторов определялась по формуле: $L_m = \frac{1}{2}(L_0 - 2L_1)$ (Гн), где: L_0 – собственная индуктивность всего реактора (Гн), L_1 – индуктивность одной ветви реактора (Гн).

В таблице 2.5 приведены параметры схем замещения уравнильных реакторов ИП обмоток CS, TF и PF ЭМС токамака КТМ.

Таблица 2.5 – Параметры схем замещения УР ИП CS, TF и PF

ИП	Уравнильный реактор	R_1 , Ом	L_1 , мГн	R_2 , Ом	L_2 , мГн	R_m , Ом	L_m , мГн
CS	УРОС–2х15-1,75 УХЛ3	$5,0 \times 10^{-3}$	1,75	$5,0 \times 10^{-3}$	1,75	0,0	0,6
TF	УРОС–500 УХЛ4	27,00013	2,0824	27,00013	2,0824	27,0	1,7038
PF1	УРОС–2х15-0,35 УХЛ3	$1,686 \times 10^{-3}$	0,348	$1,674 \times 10^{-3}$	0,314	0,0	0,0955
PF2	УРОС–2х15-0,35 УХЛ3	$1,672 \times 10^{-3}$	0,345	$1,683 \times 10^{-3}$	0,307	0,0	0,1050
PF3	УРОС–2х15-0,35 УХЛ3	$1,687 \times 10^{-3}$	0,347	$1,673 \times 10^{-3}$	0,315	0,0	0,0945
PF4	УРОС–2х15-0,35 УХЛ3	$1,687 \times 10^{-3}$	0,349	$1,675 \times 10^{-3}$	0,313	0,0	0,0960
PF5	УРОС–2х15-0,35 УХЛ3	$1,671 \times 10^{-3}$	0,344	$1,682 \times 10^{-3}$	0,308	0,0	0,1045
PF6	УРОС–2х15-0,35 УХЛ3	$1,672 \times 10^{-3}$	0,345	$1,681 \times 10^{-3}$	0,309	0,0	0,1040

2.4.3 Оптимизация схем замещения и расчет параметров преобразовательного оборудования

В целях оптимизации Simulink/Simscape модели системы импульсного электропитания токамака КТМ, уменьшения порядка системы уравнений, решаемых в процессе моделирования системы на ЭВМ, упрощения процессов анализа и интерпретации результатов, полученных в ходе моделирования принято решение о допустимом упрощении схем замещения источников импульсного электропитания КТМ.

Таким образом, все сложносоставные преобразователи системы импульсного электропитания КТМ, имеющие в своем составе параллельно соединенные мостовые выпрямители принимаются как один единый мост с шестью тиристорными ключами, параметры которых задаются соответствующим образом, с учетом их параллельного подключения в реальной схеме. За счет использования трех-лучевой схемы замещения в источнике питания обмотки ТФ, количество компонент данного источника могут быть уменьшены вдвое с соответствующим пересчетом их базовых параметров.

Схемы замещения источников питания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ, полученные после оптимизации приведены на рисунке 2.15.

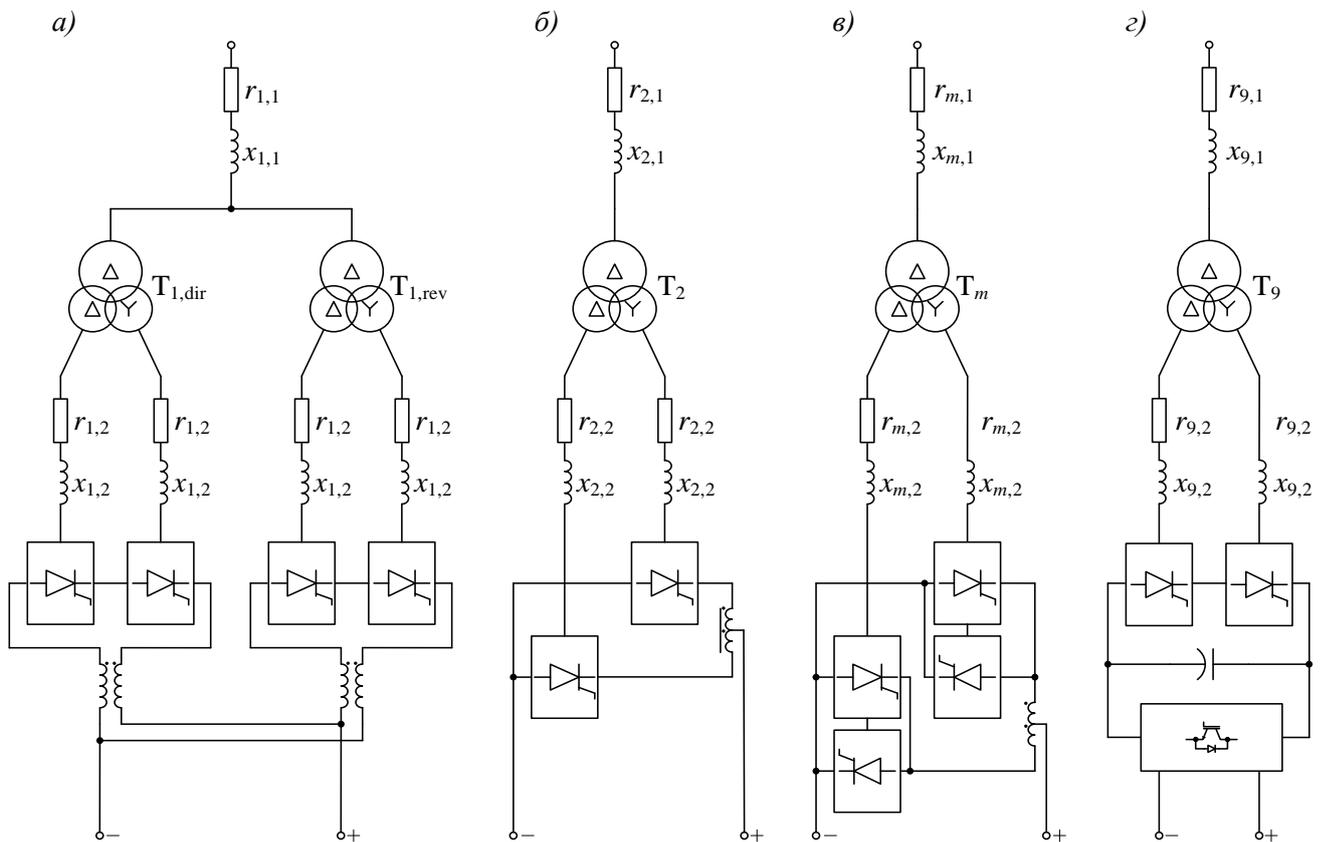


Рисунок 2.15 – Схемы замещения: а) – ИП CS, б) – ИП TF, в) – ИП PF_m, $m = 1 \dots 6$; з) – ИП HFC

Данные, необходимые для параметрирования элементов аналитической модели одного 6-пульсного мостового тиристорного преобразователя СИЭП токамака КТМ, построенного на базе однооперационных тиристоров SEMIKRON SKT-1200/18EL приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Параметры ТП СИЭП токамака КТМ

Наименование параметра	Значение параметра
Активное сопротивление снабберной цепи	$R_S = 72$ (Ом)
Емкость снабберной цепи	$C_S = 1,6$ (мкФ)
Сопротивление тиристоров в открытом состоянии	$R_{ON} = 0,4$ (МОм)
Индуктивность тиристоров во включенном состоянии	$L_{ON} = 0$ (Гн)
Падение напряжения на тиристоре во включенном состоянии	$V_F = 0,9$ (В)

Данные, необходимые для параметрирования элементов аналитической модели инвертора источника питания обмотки НФС, построенного на базе IGBT транзисторов SEMIKRON SKiiP 2403GB172-4DUFW приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Параметры инвертора источника питания обмотки НФС токамака КТМ

Наименование параметра	Значение параметра
Активное сопротивление снабберной цепи	$R_S = 0$ (Ом)
Емкость снабберной цепи	$C_S = 220$ (нФ)
Сопротивление транзисторов в открытом состоянии	$R_{ON} = 0,95$ (МОм)

Отдельные элементы модели, представляющие вышеуказанное электрооборудование, верифицированы в среде Simulink/Simscape путем сравнения их паспортных характеристик и данных, полученных при заводских испытаниях с модельными данными (опыты короткого замыкания и пр.). Допущения, принятые при моделировании СИЭП КТМ, описаны в ходе расчета электротехнических параметров оборудования.

2.5 Выводы по главе

В данной главе сформулированы основные требования к исполнительному механизму системы управления плазмой - системе электропитания обмоток ЭМС токамака КТМ, а также к её системе цифрового управления. Определена и представлена структурная схема электроэнергетического комплекса токамака КТМ. Приведены основные электротехнические решения и характеристики источников электропитания обмоток ЭМС установки КТМ, их функции, проектные режимы работы, а также используемое в их составе электротехническое оборудование.

В связи с отсутствием типовых промышленных образцов отдельных электротехнических комплектующих и преобразовательного оборудования, удовлетворяющих требованиям компоновки системы электропитания токамака КТМ, разработано специализированное (нестандартное) электрооборудование. В процессе разработки специализированное оборудование оптимизировано для целей управления и диагностики. К данному оборудованию относятся: специализированный тиристорный преобразователь (ТП) – основная структурная единица преобразовательного комплекса СИЭП токамака КТМ, полупроводниковый ключ-прерыватель постоянного тока в составе ИП обмотки CS, а также однофазный мостовой инвертор напряжения, построенный на высокомоощных интеллектуальных IGBT-транзисторах в составе ИП обмоток HFC.

Довольно оригинальное для высокомоощных AC/DC преобразователей решение проблемы распределения токов по параллельно соединенным СПП применено при компоновке ТП СИЭП токамака КТМ. Это позволило эффективно распределять ток и осуществлять оперативную диагностику состояния всех тиристоров ТП методом прямого измерения тока, протекающего через них, не ухудшая динамических характеристик ТП в целом (неизбежно при применении индуктивных делителей тока) [1]. По всем используемым в СИЭП токамака КТМ ТП коэффициент неравномерности распределения токов составил 6 % (в силовых преобразователях схожего назначения аналогичный коэффициент считается приемлемым на уровне

20% [1, 12, 20, 21]). Согласно п.п. 8.5.3 СТО РЖД 12.003-2011 данный коэффициент не должен превышать 15 %. Таким образом, достигнут результат как минимум в 2,5 раза лучший, чем требуемый по стандартам и полученный для преобразователей схожего назначения и мощности.

Разработанный специализированный полупроводниковый ключ-прерыватель, рассчитан на максимально возможный для обмотки CS токамака КТМ ток, величина которого составляет 30 кА. Отличие от схожих решений [9, 7, 27, 28, 31,] заключается в применении в качестве коммутирующих и проводящих элементов исключительно СПП (тиристоры SCR и силовых диодов) без использования электромеханических шунтирующих схем. Ключ-прерыватель работает под управлением соответствующей подсистемы управления и диагностики, построенной на базе промышленного контроллера и интегрированной в СЦУ ИП обмотки CS. Для проверки разработанной схемы ключа-прерывателя было принято решение реализовать его натурный макет [1]. В ходе экспериментов было достигнуто устойчивое прерывание и переключение тока за время порядка 3 мс. Для ключей-прерывателей, схожего назначения, предназначенных к использованию в установках ITER и JT-60SA эти времена составляют около 5,75 и 8,5 мс соответственно.

В целях последующей реализации комплексной компьютерной аналитической модели системы электропитания обмоток ЭМС токамака КТМ совместно с её системой цифрового управления в среде Simulink/Simscapе системы Matlab подготовлены необходимые исходные данные. Разработаны и оптимизированы необходимые схемы замещения. Рассчитаны и переведены в относительные единицы системы Matlab электротехнические параметры энергокомплекса КТМ: параметры точки подключения к Единой Энергосистеме Республики Казахстан, ВЛЭП 220 кВ, шинных мостов, шинопроводов и кабельных линий, трансформаторов и уравнивающих реакторов, а также преобразовательного оборудования электротехнического комплекса КТМ.

Подводя краткие итоги работы, представленной во второй главе, необходимо отметить, что в ней:

1. Определены основные требования к системе электропитания обмоток ЭМС токамака КТМ как к исполнительному механизму системы управления плазмой, в соответствии с которыми разработан и представлен проект энергокомплекса установки КТМ;

2. В связи с отсутствием типовых промышленных образцов разработано и оптимизированно для целей управления и диагностики специализированное (нестандартное) электрооборудование, необходимое для комплектации системы электропитания токамака КТМ. В целях верификации предложенных схмотехнических решений проведены макетирование и соответствующие электротехнические испытания;

3. В целях реализации комплексной аналитической модели системы электропитания токамака КТМ совместно с её системой цифрового управления подготовлены исходные данные, включающие в себя оптимизированные схемы замещения и все необходимые электротехнические параметры энергокомплекса токамака КТМ в относительных единицах системы Matlab.

Работа, представленная во второй главе, позволяет перейти к следующему этапу – разработке аналитической модели электроэнергетического комплекса токамака КТМ совместно с СЦУ источниками импульсного электропитания, разработке, верификации и внедрению соответствующих алгоритмов управления и диагностики.

Глава 3. Моделирование системы импульсного электропитания токамака КТМ в среде Simulink/Simscape совместно с её системой цифрового управления. Определение режимов работы электротехнического оборудования. Разработка и верификация алгоритмов управления и диагностики

3.1 Описание системы цифрового управления источниками импульсного электропитания токамака КТМ

Оборудование системы цифрового управления (СЦУ) источниками импульсного электропитания обмоток ЭМС токамака КТМ делится на устройства, располагаемые в электротехнических стойках СЦУ и устройства, монтируемые непосредственно в силовом электротехническом оборудовании - драйверы силовых полупроводниковых приборов (ДСК) и устройства телеметрии (ПИТ-ЗК и ППН). Структурная схема СЦУ одного отдельного источника питания КТМ показана на рисунке 3.1. Основными компонентами стойки СЦУ являются контроллеры управления и диагностики, которые имеют следующий состав модулей [5]:

- модуль центрального процессорного устройства (Процессор1), обеспечивающий управление источником питания и поддержку взаимодействия с системой синхронизации и противоаварийной защиты посредством локального модуля синхронизации (ЛМС);
- модуль центрального процессорного устройства (Процессор2), выполняющий сбор и анализ телеметрической информации о состоянии оборудования источника питания, а также информационное взаимодействие с вышестоящей системой автоматизации;
- локальный модуль синхронизации (ЛМС), предназначенный для приема временных меток от центрального блока синхронизации в процессе проведения эксперимента, а также для приема/передачи событийных сигналов противоаварийной защиты. Вместе с этим, ЛМС осуществляет прием сигналов от датчиков нулевого тока в нагрузке (ДНТ) в реверсивных ИП с отдельным управлением встречно-

направленными комплектами преобразователей. При аварии ИП ЛМС осуществляет отправку сигнала на включение устройству управления кробразаром (УУК);

- модули управления преобразователями (МУП), выполненные на основе отдельного микроконтроллера с целью независимой программно-аппаратной реализации алгоритмов управления преобразовательным оборудованием (импульсно-фазового управления, широтно-импульсной модуляции и др.);
- модули быстрогодействующего дискретного ввода\вывода (МВЦС) для приема цифровых пакетов, содержащих телеметрическую информацию от источника питания.

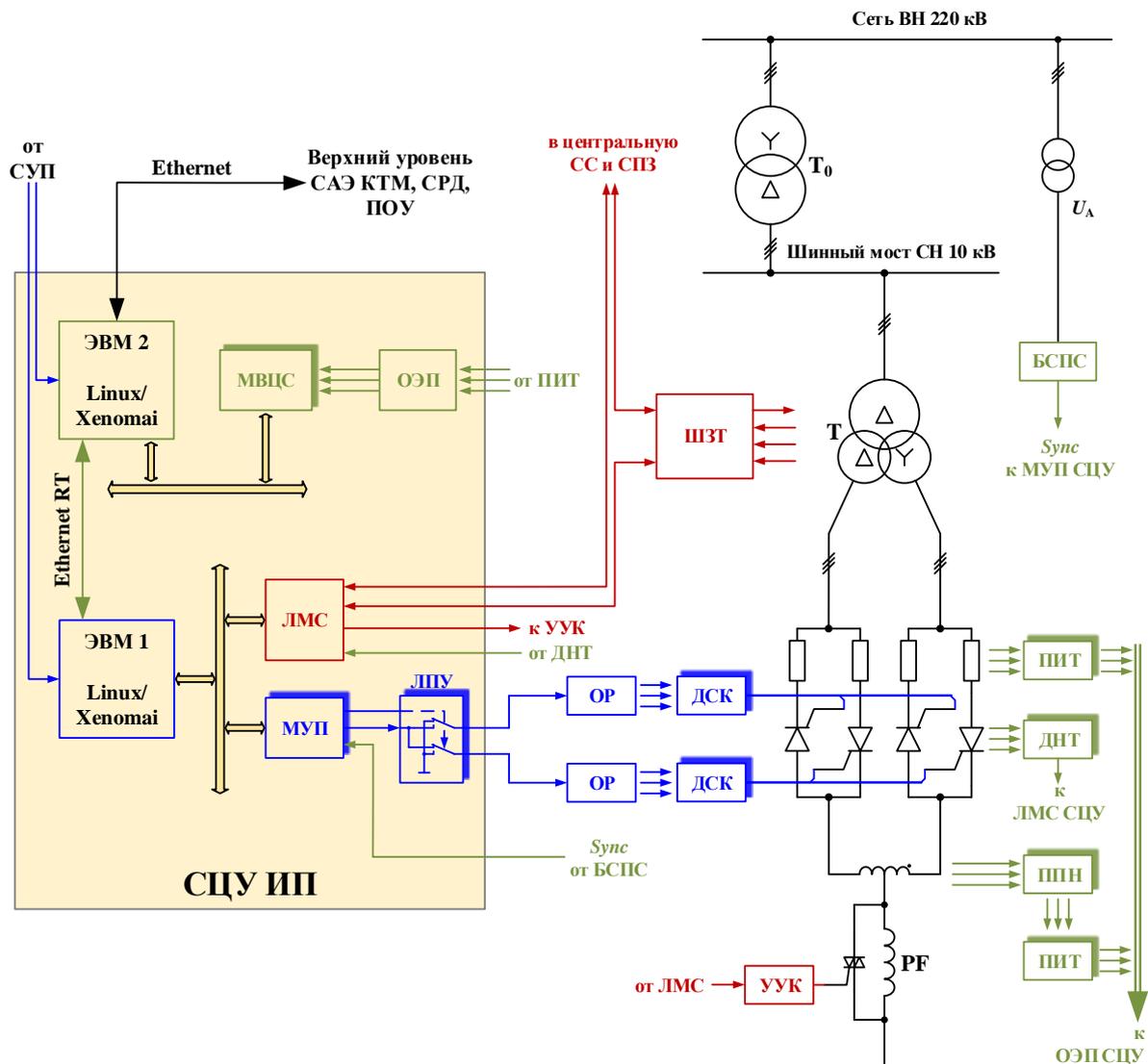


Рисунок 3.1 – Структурная схема СЦУ отдельного источника питания токамака КТМ [5]

Все используемые модули контроллеров СЦУ размещаются в электротехнические стойки стандартного размера, располагающиеся на расстоянии 30-50 метров от силовой части ИП. Передача управляющих сигналов к полупроводниковым ключам и сигналов телеметрии от преобразовательного оборудования при этом выполняется по ВОЛС, что обеспечивает помехозащищенность сигналов и гальваническую развязку СЦУ от силового электрооборудования ИП. В случае необходимости (управление параллельно соединенными ТП одним МУП) оптический сигнал размножается посредством оптических разветвителей ОР [5].

Электрооптическое преобразование сигналов выполняет модуль логического переключающего устройства (ЛПУ). ЛПУ осуществляет логическое разветвление сигналов управления, что дает возможность одновременного управления группой ТП, работающих синхронно [5].

Синхронная работа всех имеющихся в составе СИЭП токамака КТМ источников питания и синхронизация их ТП с питающей электросетью 220 кВ обеспечивается блоком БСПС, посредством детектирования перехода значения напряжения для фазы «А» через «ноль» и передачи синхросигнала к контроллерам СЦУ по волоконно-оптической линии связи через центральный блок синхронизации (ЦБС) [5].

Контроллер системы управления плазмой (СУП) на основе заранее сформированного сценария разряда с учетом каналов обратной связи (физические и электротехнические диагностики) формирует сценарии изменения токов в обмотках ЭМС КТМ посредством передачи уставок в контроллеры СЦУ. Контроллеры СЦУ в свою очередь на основе полученных уставок посредством модулей МУП реализуют импульсно-фазовое управление преобразовательным оборудованием. Вместе с этим, контроллер СЦУ принимает и обрабатывает диагностические данные о состоянии преобразовательного оборудования, тем самым осуществляет интеграцию СЦУ в систему противоаварийной защиты комплекса КТМ.

Благодаря схемотехническому решению, основанному на использовании кремниевых шунтов, примененному при разработке и оптимизации специализированного электрооборудования СИЭП токамака КТМ для целей диагностики и управления, стало возможным осуществлять непрерывную диагностику преобразовательного оборудования с глубиной до каждого отдельного СПП методом прямых измерений [1].

Диагностические модули центрального процессорного устройства СЦУ в непрерывном режиме анализируют телеметрическую информацию, получаемую непосредственно с кремниевых шунтов, посредством преобразования величины падения напряжения на них в протекающий через них ток и сравнения полученных величин с уставкой. Измерение падения напряжения на шунтах осуществляется при помощи трехканального измерительного телеметрического преобразователя (ПИТ-ЗК), цифровые сигналы которого передаются посредством ВОЛС, преобразуются в электрический вид оптико-электрическим преобразователем (ОЭП) и вводятся в контроллер посредством модулей дискретного ввода/вывода (МВЦС). Для измерения напряжения в ИП КТМ используется первичный преобразователь напряжения (ППН) в связке с ПИТ.

3.2 Математическое описание алгоритмов диагностики электротехнического оборудования КТМ

В перечень параметров контроля и оперативной диагностики преобразовательного оборудования ИП токамака КТМ входят: контроль перегрузки каждого отдельного СПП (интеграл Джоуля); контроль отклонения величины суммарного тока в параллельно соединенных СПП от общего тока в нагрузке; величина дисбаланса токов параллельно соединенных полупроводниковых приборов преобразовательных секций ТП и ключа-прерывателя; величина дисбаланса токов параллельно соединенных секций в группе ТП и ключе-прерывателе.

Величина отклонения значения тока, протекающего через отдельный тиристор относительно среднего значения тока, протекающего через преобразовательную

секцию ТП и ключа-прерывателя (величина небаланса) в процентном выражении

определяется из следующего соотношения: $\Delta I_{X,Y}^{i,j} = \left| \frac{\frac{1}{3} \sum_{r=1}^3 I_{X,Y}^{i,r} - I_{X,Y}^{i,j}}{\frac{1}{3} \sum_{r=1}^3 I_{X,Y}^{i,r}} \right|$, где: X – номер ИП в

схеме системы; Y – номер ТП в источнике электропитания; $\Delta I_{X,Y}^{i,j}$ – ток j -го тиристора ($j=1 \dots 3$) в i -той преобразовательной секции ($i=1 \dots 12$) тиристорного преобразователя ТП_{X,Y}.

Величина отклонения тока i -ой преобразовательной секции относительно среднего значения тока, протекающего через параллельно подключенные преобразовательные секции (секции ТП источника питания X , питающиеся от одноименных обмоток трансформатора и задающие ток одного направления) в процентном выражении определяется из следующего соотношения:

$\Delta I_{X,Y}^i = \left| \frac{\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \sum_{r=1}^3 I_{X,l}^{i,r} - \sum_{r=1}^3 I_{X,Y}^{i,r}}{\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \sum_{r=1}^3 I_{X,l}^{i,r}} \right|$, где: n – число параллельно подключенных

преобразовательных секций.

Для нахождения разности между суммой токов в параллельно соединенных ветвях полупроводниковых приборов и суммарным током в обмотках I_k используются

следующие соотношения: $\Delta I_{XD} = \left| \frac{\sum_{l=1}^n \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 I_{X,l}^{2i,j} - I_k}{I_k} \right|$ и $\Delta I_{XR} = \left| \frac{\sum_{l=1}^n \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 I_{X,l}^{2i-1,j} - I_k}{I_k} \right|$,

где индексом D помечены разности токов преобразовательных секций, отвечающих за ввод тока в обмотку в прямом направлении, а R в обратном.

Тепловой эквивалент j -го тиристора в i -ой секции преобразователя ТП_{X,Y} определяется на интервале периода питающей сети $T_c = 20$ мс из следующего соотношения: $TE_{X,Y}^{i,j} = \int_0^{T_c} (I_{X,Y}^{i,j}(t))^2 dt$.

3.3 Алгоритм импульсно-фазового управления источниками питания токамака

КТМ

Управление ИП токамака КТМ реализуется посредством синхронного вертикального импульсно-фазового метода, адаптированного к условиям

энергокомплекса КТМ [65, 66, 67]. Алгоритм СИФУ реализуют модули МУП, каждый из которых управляет одним или группой синхронно работающих 6-пульсных тиристорных преобразователей.

Для обеспечения корректной работы СЦУ перед запуском системы все используемые модули МУП должны быть параметрированы. Настройке подлежат следующие параметры: фазовый сдвиг вентильной обмотки трансформатора, питающего конкретный комплект преобразовательного оборудования, относительно импульсов синхронизации; форма сигнала управления на тиристор – одиночный или двоянный импульс, ширина импульса; ограничение диапазона изменения угла управления для конкретного ИП и др.

Структурная схема СИФУ ИП обмоток ЭМС КТМ изображена на рисунке 3.2.

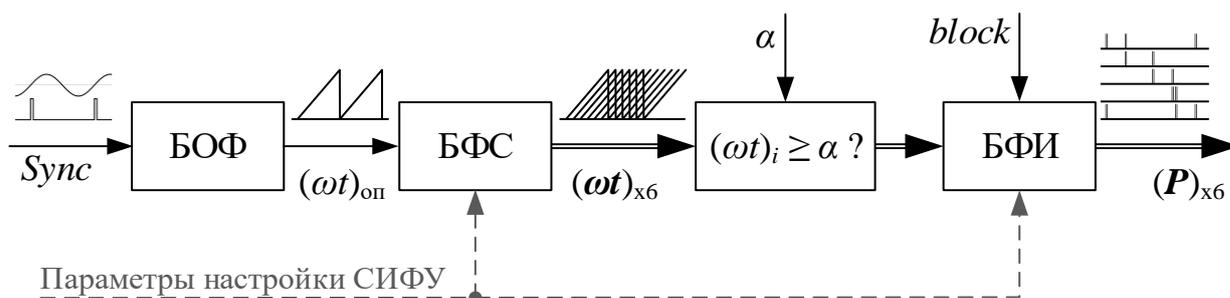


Рисунок 3.2 – Структурная схема СИФУ ИП обмоток ЭМС КТМ

Синхронизация СЦУ с питающей сетью ВН 220 кВ осуществляется посредством блока БСПС по первому фронту импульса синхронизации *Sync*, возникающего при переходе опорного напряжения фазы А через ноль. Расчет текущего значения фазы $(\omega t)_{оп}$ напряжения U_A ВН 220 кВ реализуется в блоке расчета опорной фазы (БОФ), после чего значение $(\omega t)_{оп}$ передается в блок расчета фазовых сдвигов (БФС), посредством которого формируется фазовая развертка $(\omega t)_{х6}$ 6-ти комбинаций линейных напряжений, питающих 6-пульсный преобразователь, с учетом заранее заданного фазового сдвига. Далее, значения $(\omega t)_{х6}$ сравниваются с текущей уставкой угла управления α , результат операции поступает в блок формирования импульсов управления (БФИ). Импульсы управления $(P)_{х6}$ в любой момент могут быть заблокированы командой *block*.

Данный алгоритм предложен и верифицирован в среде Simulink в составе аналитических моделей ИП обмоток ЭМС КТМ в различных режимах работы. После верификации алгоритм СИФУ был реализован программно для вычислительной платформы модуля МУП. Программное обеспечение МУП выполняет расчет импульсов управления с фиксированным временным разрешением в 55,5 мкс, что соответствует шагу изменения угла управления 1° .

3.4 Разработка алгоритма управления источником питания обмотки центрального соленоида, совместно с ключом-прерывателем постоянного тока

В описании алгоритма управления источником питания обмотки CS электромагнитной системы токамака КТМ обозначение оборудования ИП CS, включая исполнительные элементы ключа-прерывателя постоянного тока принято согласно рисункам 2.1 и 2.5. На рисунке 3.3 приведена блок-схема алгоритма управления ИП обмотки CS.

Как видно из приведенной блок-схемы, в процессе нормальной эксплуатации СИЭП при отсутствии ошибок в вышестоящей системе автоматизации на этапах подготовки к эксперименту и обработки экспериментальных данных (этапы 1-7, 16-18), а также аварийных ситуаций на ИП обмотки CS в процессе проведения эксперимента (этапы 8-15) в алгоритме управления ИП каждое последующее действие (этап) находится в логической и темпоральной зависимости от предыдущего (аварийные ситуации и противоаварийные алгоритмы СИЭП рассматриваются в четвертой главе данной работы). В начале алгоритма управления (до исполнения этапа 2) СЦУ и контроллер ключа-прерывателя ИП обмотки CS находятся в состоянии *ONLINE*. Начиная с этапа 8 СИФУ ИП обмотки CS работает под управлением контура регулирования напряжения СЦУ (или регулирования тока в обмотке CS с уставками, принимаемыми от вышестоящей системы автоматизации - СУП).

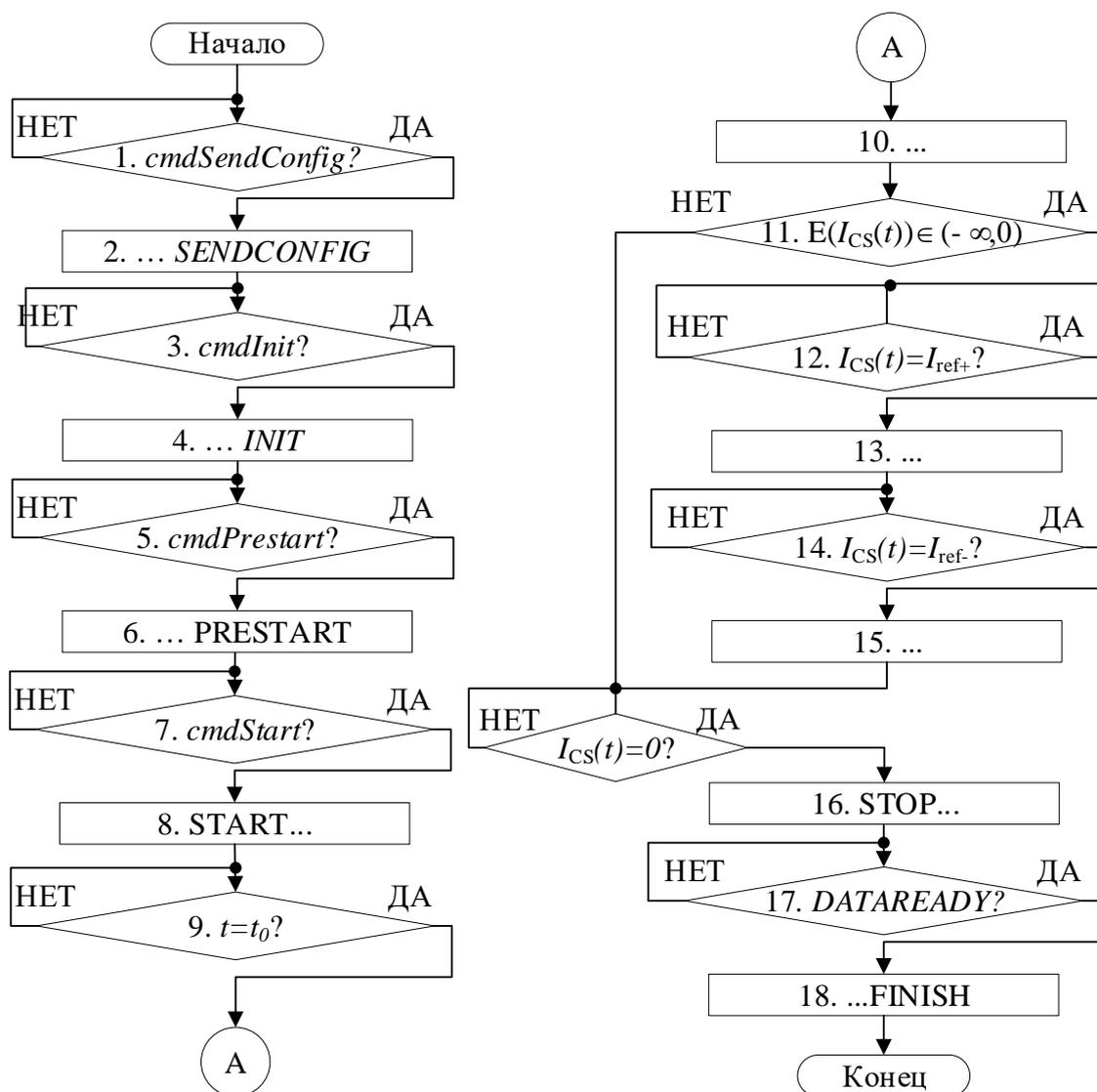


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритма управления ИП обмотки CS

В целом, в процессе подготовки и проведения эксперимента для ИП обмотки CS характерна следующая последовательность действий:

1. Ожидание СЦУ и контроллером ключа-прерывателя постоянного тока ИП обмотки CS команды *cmdSendConfig* от вышестоящей системы автоматизации;
2. Загрузка и верификация конфигурационного файла с уставкой по величине напряжения заряда конденсаторного блока ключа-прерывателя C_k и величине максимального зарядного тока в контроллер ключа-прерывателя, загрузка и верификация в СЦУ конфигурационных параметров СИФУ и диаграммы изменения напряжения на обмотке CS в течении разряда (при работе

СЦУ в режиме регулирования напряжения), переход СЦУ и контроллера ключа-прерывателя в состояние *SENDCONFIG*;

3. Ожидание СЦУ и контроллером ключа-прерывателя постоянного тока ИП обмотки CS команды *cmdInit* от вышестоящей системы автоматизации;

4. Предварительный заряд конденсаторного блока C_k ключа-прерывателя до уровня уставки, стабилизация напряжения на конденсаторном блоке C_k , формирование СЦУ локальной диаграммы изменения напряжения (уставки) ИП обмотки CS в течении разряда (в режиме регулирования напряжения). Переход СЦУ и контроллера ключа-прерывателя в состояние *INIT*;

5. Ожидание СЦУ и контроллером ключа-прерывателя команды *cmdPrestart* от вышестоящей системы автоматизации;

6. Отключение зарядного устройства ключа-прерывателя от конденсаторного блока C_k , переход СЦУ и контроллера ключа-прерывателя в состояние *PRESTART*;

7. Ожидание СЦУ и контроллером ключа-прерывателя команды *cmdStart* от вышестоящей системы автоматизации;

8. Переход СЦУ и контроллера ключа-прерывателя в состояние *START*. Включение СИФУ ИП обмотки CS, включение «прямой сборки» VTO ключа-прерывателя, ввод тока в режиме раздельного управления встречно-направленными комплектами ТП_{1.1-1.8} в обмотку CS «прямым» комплектом ТП_{1.1-1.4} через сборку VTO с максимально возможной производной до требуемого уровня согласно сценарию разряда (в данном примере до 30 кА), стабилизация тока в обмотке;

9. Ожидание временной метки старта плазменного разряда согласно заданной диаграмме ($t_{раз}=t_0$);

10. Переключение «прямого» комплекта ТП_{1.1-1.4} ИП обмотки CS в режим инвертирования тока, включение «коммутирующей» сборки VTK ключа-прерывателя постоянного тока, отключение сборки VTO, перекоммутация тока на балластное сопротивление R_{bal} , начало регулируемого вывода тока из обмотки CS через R_{bal} согласно заданному сценарию разряда;

11. В случае если реверс тока в обмотке CS сценарием разряда не предусмотрен (переход тока через нулевое значение не требуется) при $I_{CS}(t)=0$ алгоритм совершает переход к этапу 16, в противном случае к этапу 12;

12. Ожидание значения тока в обмотке, равного уставке (в данном примере $I_{ref+}= 5$ кА) в «положительном» квадранте для перехода в совместный режим управления встречно-направленными комплектами ТП_{1.1-1.8};

13. Подключение «обратного» комплекта ТП_{1.5-1.8}, работа ТП_{1.1-1.8} в совместном режиме управления по закону согласования $\alpha_1 + \alpha_2=180$ эл. град. для осуществления регулируемого перехода тока в обмотке CS через нулевое значение без токовой паузы (после перехода тока через нулевое значение он начинает протекать через сборку VDO ключа-прерывателя постоянного тока, обладающую импедансом много меньшим чем R_{bal});

14. Ожидание значения тока в обмотке, равного уставке (в данном примере $I_{ref-}= -5$ кА) в «отрицательном» квадранте для отключения режима совместного управления встречно-направленными комплектами ТП_{1.1-1.8};

15. Отключение «прямого» комплекта ТП_{1.1-1.4} ИП обмотки CS, переход в режим отдельного управления, регулируемый ввод и вывод тока «обратной полярности» из обмотки CS «обратным» комплектом ТП_{1.5-1.8} согласно заданному сценарию разряда.

16. Переход СЦУ и контроллера ключа-прерывателя ИП обмотки CS в состояние *STOP*, формирование локальных файлов регистрации экспериментальных данных разряда (данных телеметрии);

17. Ожидание вышестоящей системой автоматизации состояния *DATAREADY* СЦУ и контроллера ключа-прерывателя ИП обмотки CS;

18. Сохранение экспериментальных данных СЦУ и контроллера ключа-прерывателя ИП обмотки CS на сервере регистрации данных, переход СЦУ и контроллера ключа прерывателя в состояние *FINISH*.

На рисунке 3.4 показана диаграмма изменения углов управления ИП обмотки CS ЭМС токамака КТМ, напряжения и тока в обмотке CS, согласно базовому

сценарию разряда с обозначением границ этапов вышеописанного алгоритма управления.

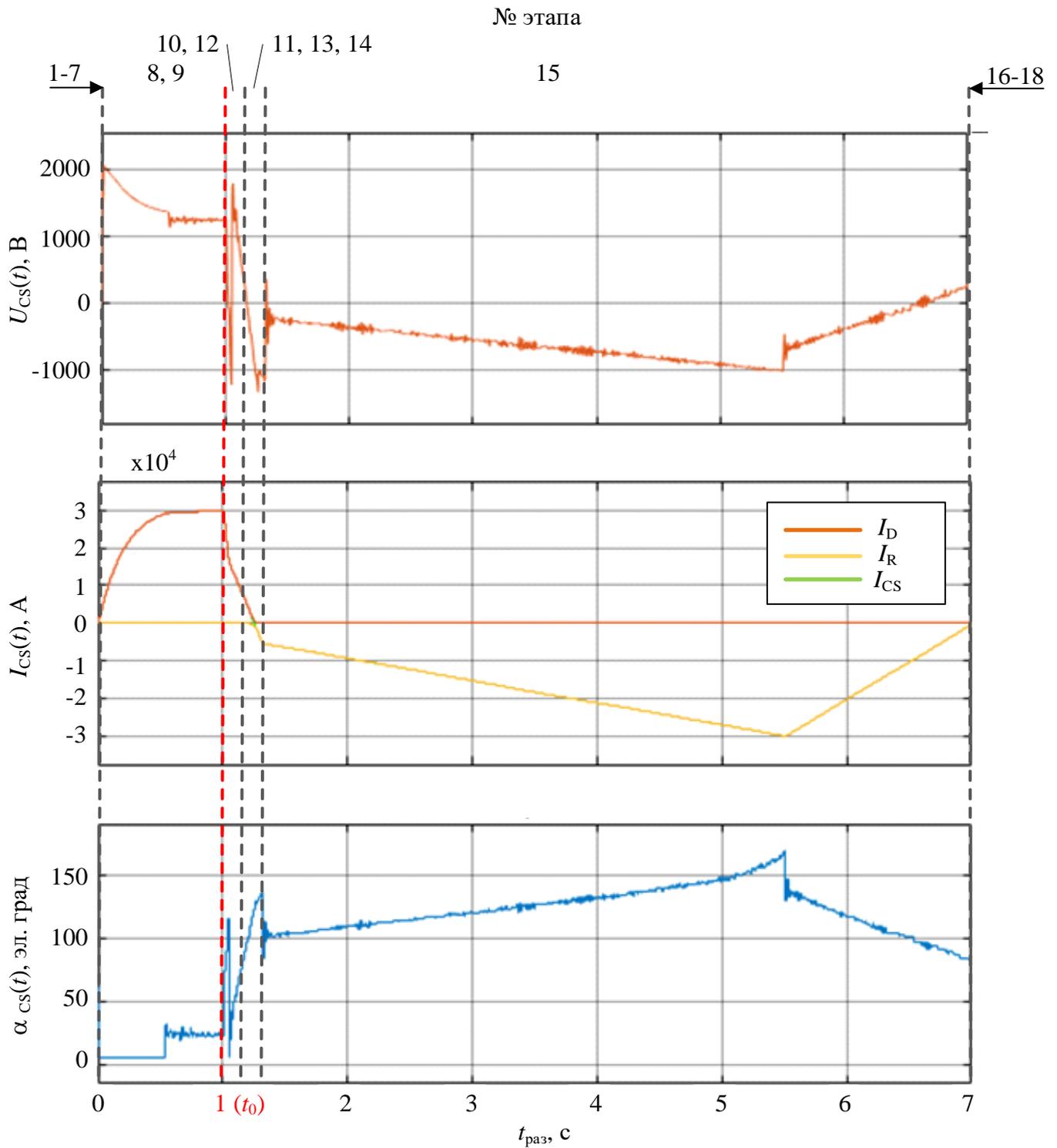


Рисунок 3.4 – Диаграмма изменения углов управления ИП обмотки CS ЭМС токамака КТМ, напряжения и тока в обмотке CS, согласно базовому сценарию разряда

На рисунке 3.5 показан фрагмент диаграммы изменения тока в ИП обмотки CS при его переходе через нулевое значение (этапы 12 - 15).

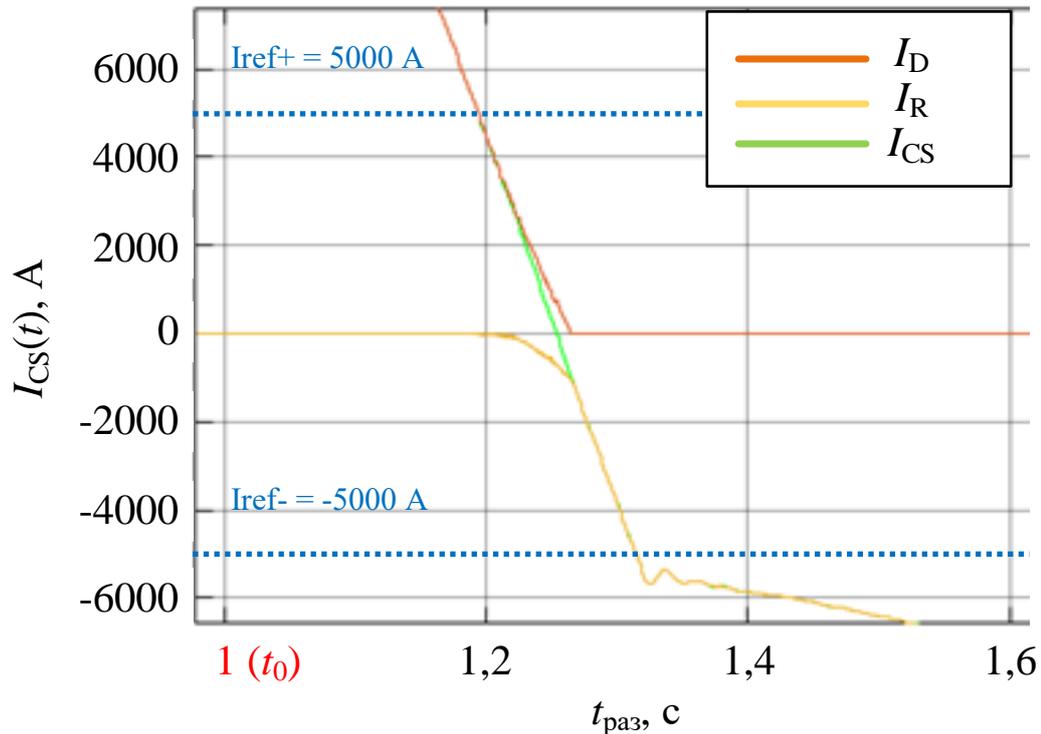
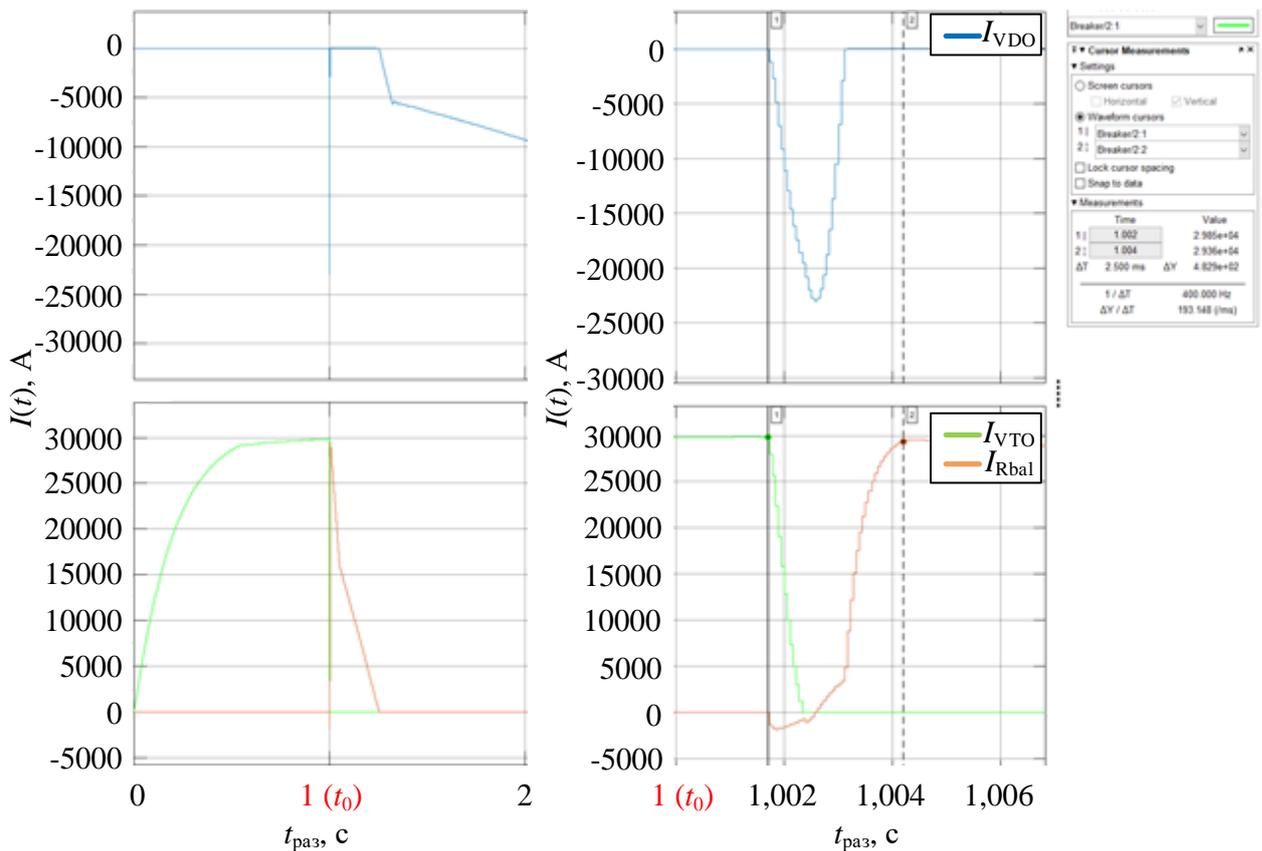


Рисунок 3.5 – Увеличенный фрагмент диаграммы изменения тока в обмотке CS в области нулевого значения

Фрагмент диаграммы имеет следующие условные обозначения: I_D – ток «прямого» комплекта ТП_{1.1-1.4}, I_R – ток «обратного» комплекта ТП_{1.5-1.8}, I_{CS} – суммарный ток в обмотке.

Из диаграммы видно, что в момент перехода тока в обмотке CS (I_{CS}) через нулевое значение токовая пауза отсутствует, при этом преобразователи ИП обмотки CS ТП_{1.1-1.8} работают в совместном режиме управления только в заранее заданном диапазоне $[I_{ref+}, I_{ref-}]$, что позволяет эффективно использовать отбираемую из питающей сети мощность.

На рисунке 3.6 изображены фрагменты диаграмм изменения тока в момент его прерывания в «прямой сборке» VTO и перекоммутации на R_{bal} ключа-прерывателя постоянного тока ИП обмотки CS при старте плазменного разряда в токамаке КТМ.



а) полный вид

б) увеличенный фрагмент

Рисунок 3.6 – Момент прерывания тока в сборке VTO и его перекоммутации на R_{bal} ключа-прерывателя постоянного тока ИП обмотки CS

Как видно из рисунка 3.6а в момент старта плазменного разряда ток в «прямой сборке» VTO прерывается и перекоммутируется на балластное сопротивление R_{bal} . При достижении тока в обмотке CS (I_{CS}) нулевого значения он начинает протекать через «обратную сборку» VDO ключа-прерывателя постоянного тока ИП обмотки CS. Из рисунка 3.6б видно, что полное время перекоммутации тока с «прямой сборки» VTO на балластное сопротивление R_{bal} ключа-прерывателя ИП обмотки CS составляет примерно 2,5 мс, что позволяет судить об эффективности примененных схемотехнических и алгоритмических решений при разработке ключа-прерывателя постоянного тока ИП обмотки CS и его подсистемы управления [7, 9, 27, 28, 31].

Данный алгоритм управления верифицирован в среде Simulink системы Matlab и реализован программно в составе СЦУ ИП обмотки CS ЭМС токамака КТМ.

3.5 Исследование статических и динамических характеристик источников импульсного электропитания

Статические характеристики источников импульсного электропитания токамака КТМ представляются внешней характеристикой многофазных тиристорных преобразователей, входящих в их состав, определяющей зависимость средневыхпрявленного напряжения на выходе источников питания при различных углах управления обеспечиваемых СИФУ от тока в нагрузке $U_d = f(\alpha, I_d)$. Известны конкретные, существенно различные режимы работы преобразователей, которые определяются в том числе и характером нагрузки [5, 62, 68, 69]. Их границы определены углом коммутации γ [62], зависящим от величины тока в нагрузке и текущего угла управления $\gamma = f(\alpha, I_d)$. В соответствии с [70], для 12-пульсных схем выпрямления, используемых при компоновке СИЭП токамака КТМ, выделяются нижеследующие режимы [5]:

- Режим № 1, при котором угол коммутации составляет $\gamma < 30^\circ$. В данном режиме, в момент отсутствия процессов перекоммутации ток проводят одновременно по 2 тиристора на каждый 6-пульсный мост выпрямления. В процессе перекоммутации в одном из 6-пульсных мостов ток начинает проводить 3-й тиристор. В данном режиме можно считать, что процессы коммутации в обоих 6-пульсных мостах происходят независимо.

- Режим № 2, при котором угол коммутации составляет $\gamma = 30^\circ$. Данный режим является переходным. По завершению процесса коммутации пары тиристоров из моста, в котором процесс перекоммутации начался – немедленно начинается процесс коммутации во втором мосте. Ток одновременно проводят 5-ть тиристоров.

- Режим № 3, при котором угол коммутации составляет $30^\circ < \gamma < 60^\circ$. В данном режиме ток проводят одновременно уже 6-ть тиристоров и процесс коммутации в одновременно работающих 6-пульсных мостах уже не является независимым.

- Режим № 4, при котором угол коммутации составляет $\gamma \geq 60^\circ$. Такой режим работы сопровождается существенной перегрузкой электротехнического оборудования, входящего в состав источников питания. Кривая значения средневыхпрявленного напряжения в процессе роста тока в нагрузке существенно искажается («заваливается»).

Внешнюю характеристику 12-пульсных источников питания обмоток ЭМС токамака КТМ целесообразно строить для режима работы № 1, относящегося к нормальному режиму работы преобразовательного оборудования в данной конфигурации.

Таким образом, учитывая параметры нагрузки - для идеально сглаженного выпрявленного тока внешняя характеристика источника питания может быть выражена как [5]:

$$U_d = U_{d0} \cos(\alpha) - \Delta U_X(I_d) - \Delta U_R(\gamma, I_d) - \Delta U_B, \quad (3.1)$$

где: α – угол управления ($0^\circ < \alpha < 180^\circ$); U_{d0} – напряжение холостого хода (ХХ) преобразователя при $\alpha = 0^\circ$; ΔU_X – индуктивное падение напряжения в цепи коммутации; ΔU_R – активное падение напряжения на элементах схемы; ΔU_B – падение напряжения на вентилях преобразователя.

Напряжения U_{d0} , ΔU_X и ΔU_R , а также угол коммутации γ , определяются схемой компоновки преобразователей [68]. В связи с тем, что $\Delta U_X \gg \Delta U_R, \Delta U_B$ – при построении внешних характеристик ИП ΔU_R и ΔU_B можно пренебречь.

Поскольку все ИП ЭМС токамака КТМ построены по 12-пульсной схеме выпрямления, для схем ИП с параллельным соединением мостовых преобразователей, питающихся от разноименных вентильных обмоток согласующих трансформаторов - Д и У (ИП TF и PF) внешняя характеристика задается базовым электротехническим соотношением [5]:

$$U_d = \frac{(U_{dД} + U_{dУ})}{2}, \quad (3.2)$$

тогда как, внешняя характеристика ИП, имеющих в составе последовательно соединенные преобразователи (ИП CS) определяется как:

$$U_d = U_{dД} + U_{dУ}, \quad (3.3)$$

где $U_{dД}$ и $U_{dУ}$ – средневыпрямленные напряжения преобразователей, подключенных к разноименным обмоткам трансформаторов (согласно [62], учитывая конструктивные особенности, линейные напряжения разноименных обмоток трансформаторов практически равны, поэтому $U_{dД} \approx U_{dУ}$).

Средневыпрямленное напряжение XX ИП обмоток ЭМС КТМ определяется выражением [130]:

$$U_{d,xx} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2л} \cos(\alpha), \quad (3.4)$$

где $U_{2л}$ – действующее значение линейного напряжения вентильных обмоток трансформатора, которое для ИП, имеющих в составе параллельно соединенные преобразователи учитывая (3.2) будет представлено выражением:

$$U_{2л} = \frac{1}{2} (U_{2лД} + U_{2лУ}), \quad (3.5)$$

аналогично, для ИП имеющих в составе преобразователи, соединённые последовательно, учитывая (3.3):

$$U_{2л} = U_{2лД} + U_{2лУ} \quad (3.6)$$

При работе ИП на больших углах управления и больших значениях тока в нагрузке возможно возникновение аварийной ситуации, называемой опрокидывание инвертора, в этой связи максимальный угол управления необходимо ограничивать исходя из соотношения [5, 65, 66]:

$$\alpha_{\max} + \gamma + \delta \leq 180^\circ, \quad (3.7)$$

где δ – время восстановления запирающих свойств тиристоров (около 2° – 5° для применяемых в проекте СИЭП КТМ тиристоров), вместе с этим, необходимо учесть ошибку СИФУ, которая при различных условиях может достигать 1° – 2° . В связи с наличием паразитных индуктивностей в параллельно соединенных ветвях тиристоров, которые имеют некоторое отличие друг от друга, величина δ может превышать вышеуказанные значения и должна быть исследована для каждого ИП индивидуально. Поскольку измерение тока в нагрузке аппаратными средствами

СЦУ в режиме реального времени невозможно (эта функция реализована в рамках вышестоящей системы СУП) - максимальный угол управления, как и угол аварийного инвертирования рассчитывается индивидуально для каждого ИП на этапе подготовки к эксперименту, исходя из компоновки схемы ИП, анализа диаграмм токов и напряжений, которые должны быть достигнуты в конкретном сценарии разряда [5].

Динамические характеристики источников питания токамака КТМ выражаются в следующих свойствах [5, 66, 67, 71]:

- Дискретность многофазного тиристорного преобразователя, связанная с особенностью воздействия угла управления СИФУ на формирование напряжения только в конкретные дискретные моменты времени. Период дискретности в этом случае будет равен:

$$T_{\text{ИП}} = \frac{1}{mf_0}, \quad (3.8)$$

где m – пульсность преобразователя (для всех тиристорных ИП КТМ $m=12$), f_0 – частота питающей сети (50 Гц).

- Присутствие пульсаций выходного напряжения с определенной частотой:

$$f_{\text{ИП}} = \frac{1}{T_{\text{ИП}}} \quad (3.9)$$

- Неполная управляемость ИП, объясняемая различием характера изменения напряжения на выходе источника питания при изменении угла управления α с соответствующей скоростью. Скорость уменьшения угла управления никак не ограничена, в момент увеличения угла управления α со скоростью больше $\left| \frac{d\alpha}{dt} \right| \geq 2\pi f_0$ - напряжение на выходе ИП будет иметь существенные нелинейные искажения относительно сигнала уставки, в связи с невозможностью закрытия тиристора в состоянии проводимости со скоростью большей требуемого для этого изменения напряжения фазы линии питания переменного тока [5].

В случае гармонического воздействия сигнала управления ИП с частотой $< f_0$ – ИП можно считать линейным, тогда как при воздействии сигнала управления с

частотой $\geq f_0$ выходное напряжение будет содержать гармонические искажения сложного характера [66]. Рабочая частота управляющего воздействия ограничена частотой: $f_{гр} = \frac{mf_0}{2}$. В замкнутой системе управления на выходе ИП возможно возникновение автоколебаний выходного напряжения с соответствующими субгармоническими частотами [130]:

$$f = \frac{f_{гр}}{n}, \quad n = 2, 3, \dots, \quad (3.10)$$

такой эффект становится опасным с ростом тока в нагрузке, и это необходимо учесть при настройке параметров регулятора СЦУ.

Таким образом, статические и динамические параметры тиристорных ИП существенно нелинейные, что накладывает определенные ограничения на диапазон управления. Это обстоятельство должно быть учтено в процессе синтеза замкнутой системы управления выходным напряжением источников питания КТМ в целях обеспечения её устойчивости [5].

3.6 Реализация контура автоматического управления напряжением на обмотках электромагнитной системы токамака КТМ

Без использования системы управления плазмой, СЦУ источниками питания установки КТМ работает в режиме регулирования средневыврямленного напряжения на нагрузке. В данном режиме транслируемые в момент конфигурации СЦУ (перед началом разряда) уставки напряжения рассчитываются вышестоящей СУП уже с учетом взаимного влияния обмоток ЭМС и плазмы.

Регулирование реализовано с использованием обратных связей в соответствии с заранее заданной диаграммой (уставкой). Данный режим должен обеспечивать требуемый сценарий изменения тока в обмотке, при этом, для обеспечения необходимой динамики изменения тока выходное напряжение ИП может принимать любые значения во всем допустимом диапазоне его изменения. Объект управления в данном случае – собственно источник питания, регулируемая величина – его выходное напряжение [5]. Функциональная схема замкнутой

системы управления напряжением источника питания КТМ отображена на рисунке 3.7.

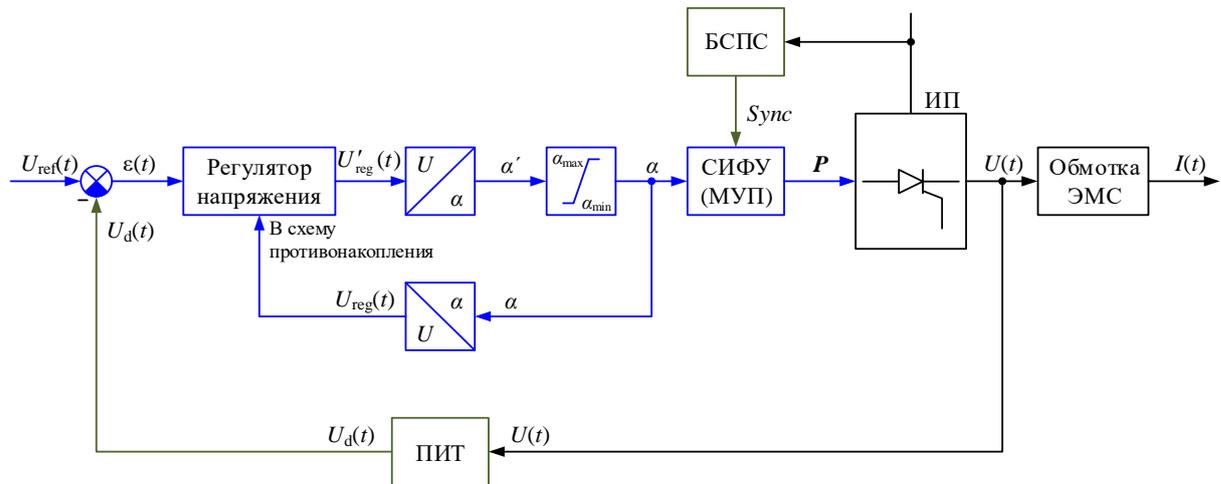


Рисунок 3.7 – Функциональная схема САУ напряжением ИП КТМ [130]

Измерение выходного напряжения ИП реализовано посредством модуля ПИТ. Сигнал рассогласования - результат сравнения измеренного напряжения $U_d(t)$ и текущей уставки $U_{ref}(t)$ подается на регулятор, на выходе которого формируется требуемое напряжение $U'_{reg}(t)$, преобразующееся в текущий угол управления α , который в свою очередь транслируется в модули МУП, непосредственно реализующие алгоритм СИФУ ИП обмоток ЭМС КТМ [5].

Очевидно, что данная цифровая система дискретна и по шкале уровня сигналов, и по шкале времени. Период дискретности ИП обмоток ЭМС КТМ согласно (3.8) $T_{ИП} = 1,666(6)$ мс. Данное значение принято в качестве цикла цифровой системы управления ($T_s = T_{ИП}$), поскольку уменьшение T_s не приведет к существенному улучшению динамических свойств ИП обмоток ЭМС КТМ (за период питающей сети выходное напряжение меняется не более 12 раз). Однако, учитывая, что в рассматриваемой системе цифровые устройства - ПИТ, управляющая и диагностическая ЭВМ СЦУ работают асинхронно, принятие величины T_s в вышеуказанном диапазоне позволит ограничить величину запаздывания, характерную для цифровых СУ [5].

Дискретность системы по шкале уровня сигнала определена особенностью и алгоритмом работы СИФУ, реализованной на базе модуля МУП, аппаратная

платформа которого делает возможным осуществлять управление ИП исключительно для целочисленных значений α – с точностью в 1° . Величину ступенчатого изменения средневыврямленного напряжения на выходе ИП при изменении угла управления α на 1° возможно рассчитать с использованием выражения (3.4) как [5]:

$$\Delta U_d = \left| \frac{dU_d}{d\alpha} \right| \Delta\alpha = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2,л} \sin(\alpha) \Delta\alpha = \frac{3\sqrt{2}}{180} U_{2,л} \sin(\alpha) \quad (3.11)$$

На рисунке 3.8 отображены графики изменения напряжения ΔU_d для ИП обмоток TF, CS и PF.

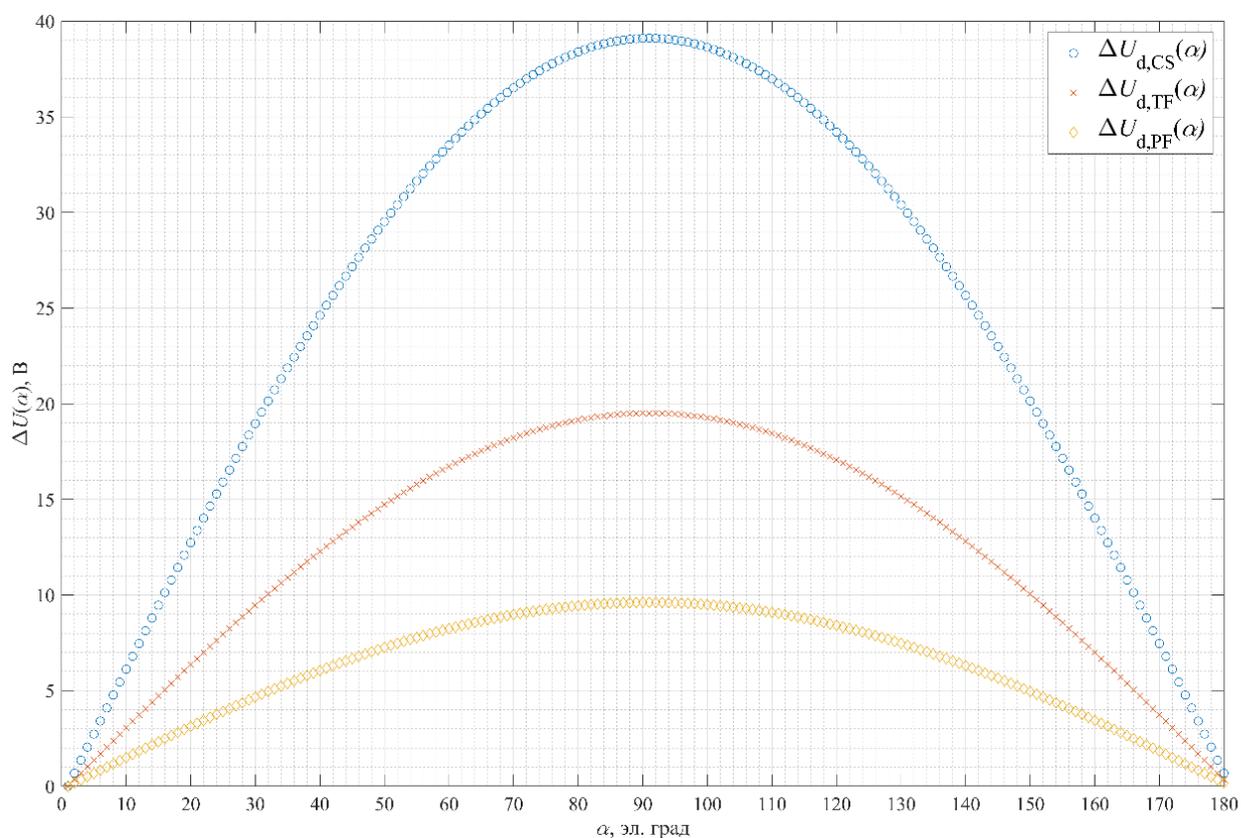


Рисунок 3.8 – Величина изменения напряжений ИП обмоток TF, CS и PF ($\Delta U_{d,TF}$, $\Delta U_{d,CS}$ и $\Delta U_{d,PF}$) при изменении угла α на 1°

Как видно из рисунка 3.8 при угле управления $\alpha = 90^\circ$ величина на которую ступенчато изменяется напряжение на выходе ИП (ΔU_d) достигает своего максимума, при этом для ИП CS она составляет приблизительно 40 В, для ИП TF около 20 В, для всех ИП PF примерно 10 В. Таким образом, с учетом электротехнических параметров обмоток ЭМС КТМ (таблица А.1) –

незначительное изменение значения угла управления α в определенном диапазоне приводит к ощутимому изменению тока в нагрузке. В таких условиях замкнутая система управления с астатическим регулятором может войти в автоколебательный режим работы и это обстоятельство необходимо учесть при синтезе цифрового регулятора средневыпрямленного напряжения на выходе ИП токамака КТМ [5].

С учетом вышеизложенного требования к цифровому регулятору сформированы следующим образом:

- Передаточная функция замкнутой системы управления $W(s)$ должна быть ≈ 1 , в масштабах времени, определенных постоянными времени нагрузки;
- Статическая ошибка регулирования должна стремиться к нулю;
- В структуре регулятора необходимо предусмотреть схему противонакопления;
- Колебания угла управления α при постоянной уставке не должны приводить к автоколебательному режиму работы системы управления.

Регулятор напряжения источников питания токамака КТМ намечен к реализации с ПИ структурой, поскольку такая структура обладает требуемым астатизмом, вместе с этим для неё известно довольно много методов настройки [5].

3.6.1 Синтез цифрового регулятора напряжения

В соответствии с (3.1) и (3.4) выходное напряжение ИП определяется следующим соотношением [5, 68]:

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2л} \cos(\alpha) - \Delta U_X(I_d), \quad (3.12)$$

из данного выражения следует, что зависимость U_d от угла управления α не является линейной, вместе с этим U_d зависит от величины тока в нагрузке I_d , влияющего на величину индуктивного падения напряжения ΔU_X , возникающего в следствии коммутационных процессов в вентилях тиристорных преобразователей. Зная текущую величину тока в нагрузке I_d , падение напряжения ΔU_X возможно скомпенсировать (к примеру, с использованием СУ с компенсацией по

возмущению). Поскольку прямое измерение тока в нагрузке для СЦУ не доступно, ΔU_X для объекта управления будем считать возмущением. Внешней характеристикой невозмущенного объекта будет являться выходное напряжение ИП в режиме ХХ (3.4). Данная характеристика будет применена при линеаризации объекта управления, при этом угол α' будет вычисляться как [5]:

$$\alpha' = \arccos\left(\frac{\pi U'_{\text{reg}}}{3\sqrt{2}U_{2л}}\right) \quad (3.13)$$

При подстановке (3.13) в (3.4) становится очевидным, что $U_{d,xx} = U'_{\text{reg}}$. В целях предотвращения возможных аварий преобразователей ИП обмоток ЭМС КТМ (опрокидывание, прорыв инвертора) угол управления ограничивается из следующих условий [5]:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{\min}, & \alpha' < \alpha_{\min}, \\ \alpha', & \alpha_{\min} \leq \alpha' \leq \alpha_{\max}, \\ \alpha_{\max}, & \alpha' > \alpha_{\max}, \end{cases} \quad (3.14)$$

тем самым вводя ограничение на диапазон изменения выходной координаты регулятора - U_{reg} . Максимальная величина угла управления α_{\max} ограничивается в соответствии с (3.7), где δ консервативно принимается равной примерно 5° – 10° . Минимальное значение угла управления α_{\min} принимается $\geq 2^\circ$, учитывая точность работы МУП и блока БСПС [5].

Цифровой ПИ-регулятор с интегрированием по методу трапеций представлен следующей передаточной функцией [5]:

$$W_{\text{ПИ}}(z) = k \left(1 + \frac{1}{T_i} \frac{T_s}{2} \frac{z+1}{z-1} \right), \quad (3.15)$$

где T_s – цикл управления, T_i – время интегрирования, k – коэффициент передачи. На рисунке 3.9 отображена структурная схема САУ средневыпрямленным напряжением на выходе ИП токамака КТМ.

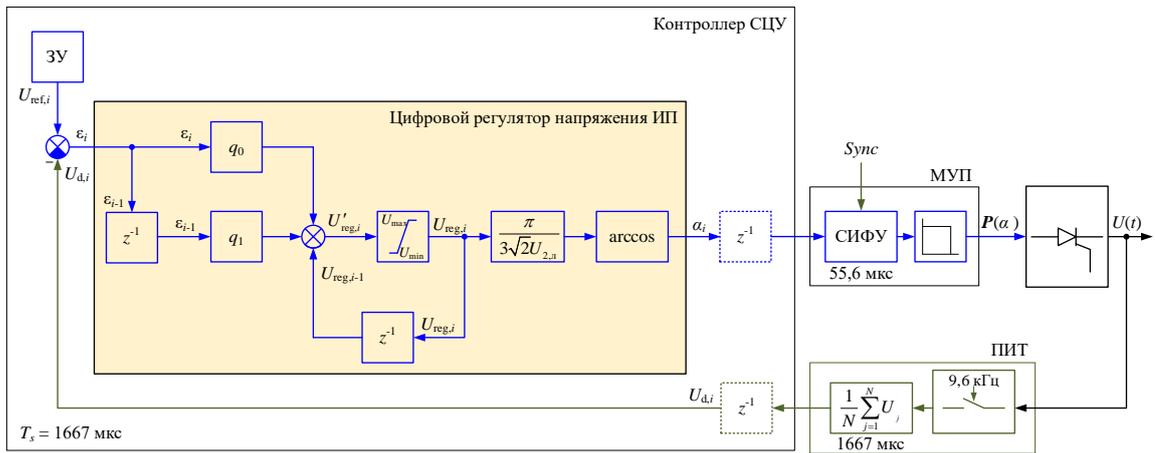


Рисунок 3.9 – Структурная схема САУ напряжением ИП токамака КТМ [5]

Структура цифрового регулятора, отображенная на рисунке 3.9 представлена в рекуррентной форме, что позволяет вычислять выходную координату для i -го цикла управления, как [5]:

$$U'_{\text{reg},i} = U_{\text{reg},i-1} + q_0 \varepsilon_i + q_1 \varepsilon_{i-1}, \quad (3.16)$$

где q_0 и q_1 – коэффициенты, определяющиеся циклом управления и параметрами настройки регулятора [5]:

$$q_0 = k \left(1 + \frac{T_s}{2T_{\text{и}}} \right), \quad q_1 = k \left(\frac{T_s}{2T_{\text{и}}} - 1 \right). \quad (3.17)$$

Рекуррентным соотношением (3.16) уже предусмотрена схема противонакопления, являющаяся одним из основных требований к синтезируемому регулятору напряжения, поскольку значение координаты на выходе регулятора на предшествующем цикле управления ($U_{\text{reg},i-1}$) переопределено с учетом ограничений угла управления (3.14) [5].

Распределенный характер СЦУ, схема которой представлена на рисунке 3.1, определяющийся наличием нескольких последовательно включенных и асинхронно работающих цифровых устройств (ПИТ, управляющая и диагностическая ЭВМ контроллера СЦУ, МУП и др.) учитывается введением единичных запаздываний, отраженных на структурной схеме, представленной на рисунке 3.9. Временные смещения циклов работы вышеуказанных цифровых устройств ведут к возникновению запаздываний случайного характера. Для

решения вопросов, связанных с настройкой контура управления средневыходным напряжением на выходе ИП токамака КТМ, величина запаздывания принимается максимально возможной [5].

Методы настройки замкнутых систем управления тиристорными преобразователями (электроприводами постоянного тока) и соответствующих регуляторов в их структуре подробно рассмотрены в [65, 66, 67, 71]. В основном данные методы используют упрощенные линейные модели преобразователей (линеаризованные импульсные модели с применением ШИМ первого и второго рода [66]), модифицированное Z-преобразование [67, 71], либо эвристические модели с выбором передаточной функции для преобразователя как для простого звена с запаздыванием или апериодического звена первого порядка с запаздыванием [72]. Современные среды компьютерного моделирования, такие как Simulink/Simscape в решении задач настройки контуров регулирования замкнутых систем управления преобразователями используют более сложные модели объектов управления, с учетом их особых динамических и статических характеристик [5].

3.7 Моделирование системы импульсного электропитания совместно с её системой цифрового управления

Принимая во внимание сложность системы электропитания обмоток ЭМС токамака КТМ и соответствующей СЦУ, их распределенный характер, при реализации компьютерной аналитической модели систем разработана специализированная библиотека модулей Simulink/Simscape, в состав которой вошли следующие модули [5]:

- Модуль физических моделей ИП обмоток ЭМС, реализованных в соответствии с разработанными схемами замещения и их параметрами (модели питающей сети, преобразовательного оборудования, обмоток ЭМС токамака КТМ и др.);

- Модуль управления – блоки СЦУ, реализующие алгоритмы управления источниками питания токамака КТМ (МУП, регулятор напряжения, ЛПУ и др.);
- Модуль измерения – сенсоры и телеметрические измерительные преобразователи (БСПС, ПИТ, ДНТ и др.).

С использованием данной библиотеки модулей возможна разработка моделей для решения конкретных задач с различной конфигурацией ИП и их СЦУ. Структурная схема компьютерной аналитической модели энергокомплекса КТМ совместно с СЦУ его источниками питания, реализованная с использованием соответствующей библиотеки изображена на рисунке 3.10.

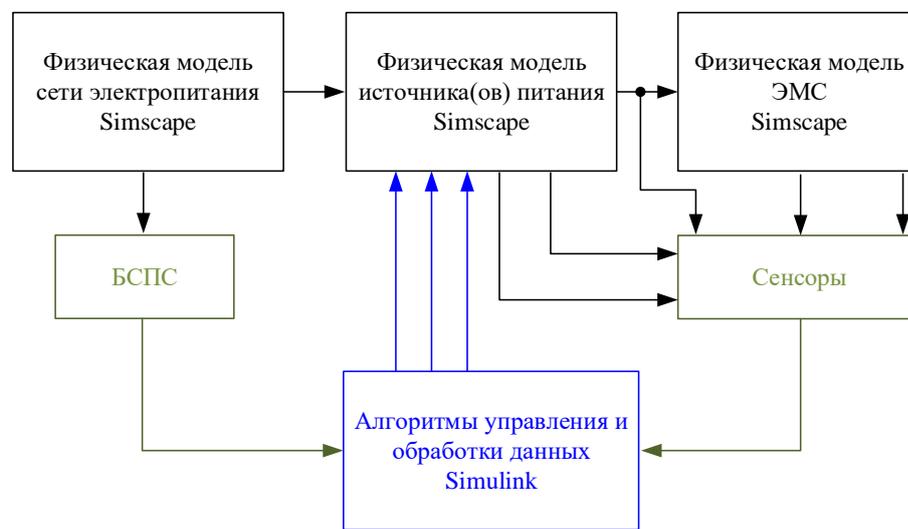


Рисунок 3.10 – Структурная схема аналитической Simulink/Simscape модели системы электропитания токамака КТМ совместно с её СЦУ [5]

3.7.1 Настройка и верификация параметров контура управления средневыпрямленным напряжением

Принимая во внимание особенности работы СИФУ (изменение угла управления α происходит дискретно с шагом, кратным 1°), с учетом требований к цифровому ПИ-регулятору напряжения на выходе ИП токамака КТМ, становится очевидной возможность возникновения автоколебаний на выходе соответствующей СЦУ. В этой связи, первостепенной задачей при настройке параметров контура управления напряжением ИП является ограничение

амплитуды для установившихся колебаний угла управления α в диапазоне 1° - 3° при постоянной (установившейся) уставке напряжения (учитывая различную длительность циклов управления по времени СИФУ (МУП), БСПС и других асинхронно работающих цифровых устройств) [5].

Первоначальную оценку параметров настройки цифрового ПИ-регулятора напряжения возможно выполнить с использованием передаточной функции тиристорного преобразователя вида [5, 72, 73]: $w_{\text{ИП}}(s) = \frac{e^{-T_{\text{ИП}}s}}{T_{\text{ИП}}s+1}$, где $T_{\text{ИП}} = 1,666(6)$ мс – период дискретности.

Параметры регулятора возможно рассчитать с применением довольно большого множества известных методов расчета для линейных систем автоматического управления. В данной работе использован метод, основанный на критерии оптимального модуля [74]. Расчетные значения первоначальных параметров настройки цифрового ПИ-регулятора напряжения составили: $k_0 = 0,57143$, $T_{\text{и},0} = 1,7707$ мс [5].

С целью уточнения параметров настройки регулятора в среде Simulink/Simscape был проведен ряд экспериментов с использованием аналитической модели ИП токамака КТМ. Варьировались входные воздействия, параметры настройки регулятора с целью выхода на такой режим работы, при котором установившаяся амплитуда колебания угла управления α не превышала бы 1° - 3° (замкнутая система управления была бы устойчива), при этом выходное напряжение ИП соответствовало уставке, а эволюция тока в обмотке соответствовала расчетному сценарию. По завершению экспериментов получены следующие значения: $k \approx 0,3$, $T_{\text{и}} \approx T_{\text{ИП}} = 1,667$ мс. Данные параметры настройки цифрового ПИ-регулятора напряжения были загружены в СЦУ при проведении комплексной наладки СИЭП токамака КТМ с включением ИП на обмотки ЭМС. Для проверки корреляции экспериментальных данных, полученных в реальных разрядах токамака КТМ и данных, полученных при компьютерном моделировании ИП обмоток ЭМС КТМ в режиме регулирования напряжения, проведена соответствующая серия экспериментов [5].

Пример Simulink/Simscapе модели ИП обмотки CS совместно с его СЦУ представлен на рисунке 3.11. Модель реализована в соответствии с вышеописанными схемами замещения и их параметрами. В центре модели расположен блок синтезируемого цифрового ПИИ-регулятора напряжения. Аналогичный вид имеют модели остальных ИП обмоток ЭМС КТМ.

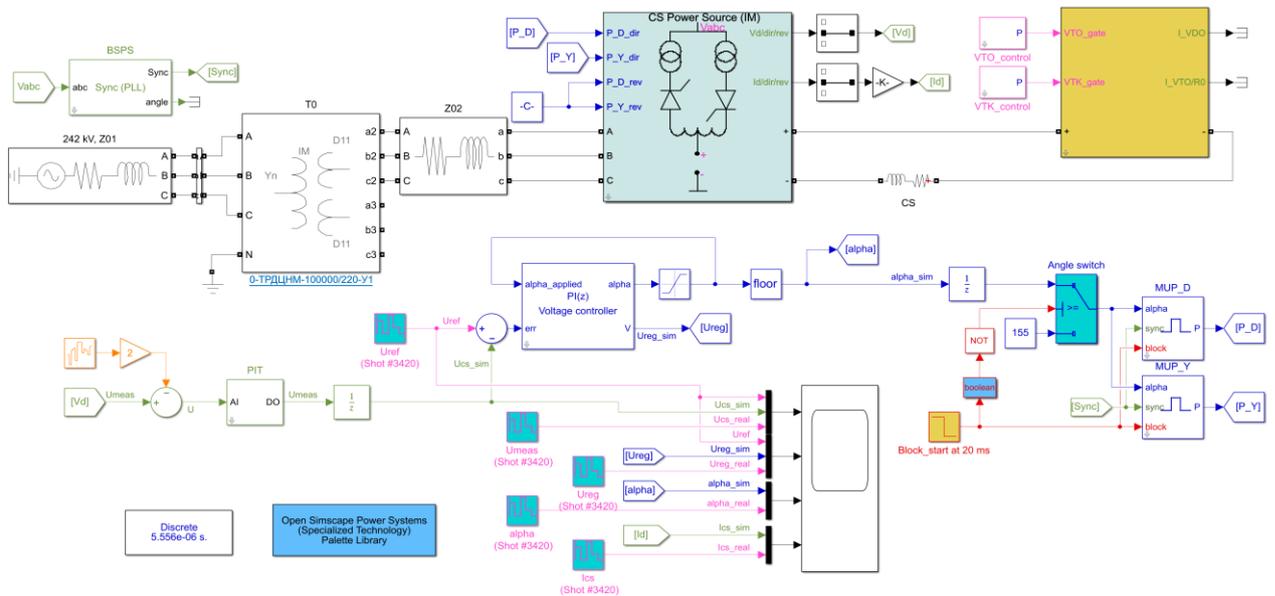


Рисунок 3.11 – Simulink/Simscapе модель ИП обмотки CS совместно с его СЦУ

В процессе проведения наладочных работ на СИЭП и реализации реальных разрядов на установке КТМ, посредством средств телеметрии СЦУ регистрировалась и заносилась в базу данных экспериментов следующая информация: уставка напряжения, выходное напряжение ИП, выходная координата регулятора напряжения, угол управления α . Кроме этого, посредством подсистемы сбора данных ИИС КТМ регистрировались и заносились в базу данных показания поясов Роговского, измеряющих токи в обмотках ЭМС КТМ. Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование реализовано при одинаковых уставках напряжений, синхронизированных по времени друг с другом. Графики, отражающие результат сравнения экспериментальных данных и данных, полученных при моделировании для трех различных в конструктивном исполнении тиристорных ИП ЭМС КТМ (охватывающих всю номенклатуру таких ИП для КТМ) приведены на рисунках 3.12, 3.13 и 3.14 [5].

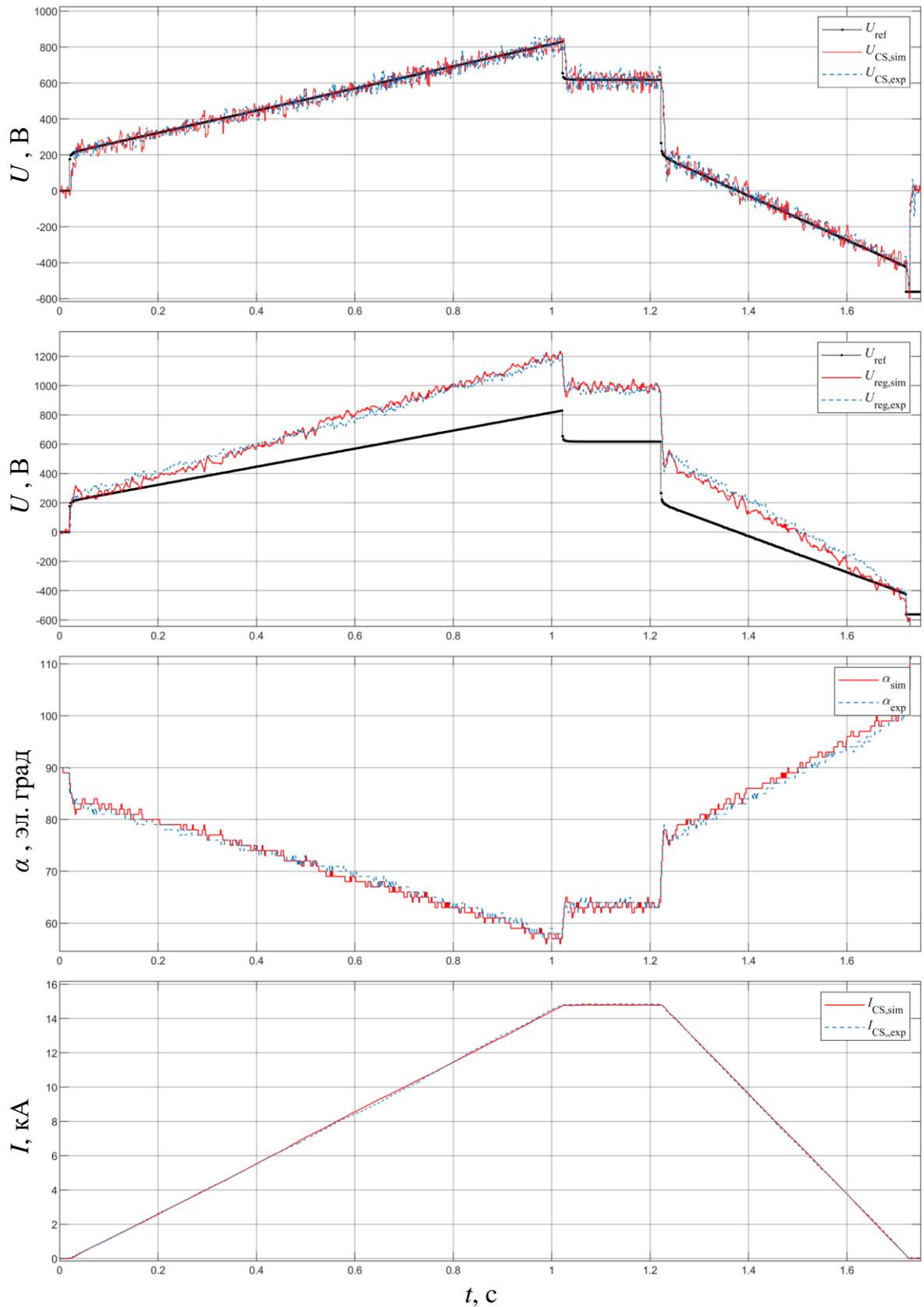


Рисунок 3.12 – Сравнение результатов моделирования ИП CS ($U_{CS,sim}$, $U_{reg,sim}$, α_{sim} и $I_{CS,sim}$) с экспериментальными данными разряда ($U_{CS,exp}$, $U_{reg,exp}$, α_{exp} и $I_{CS,exp}$) [5]

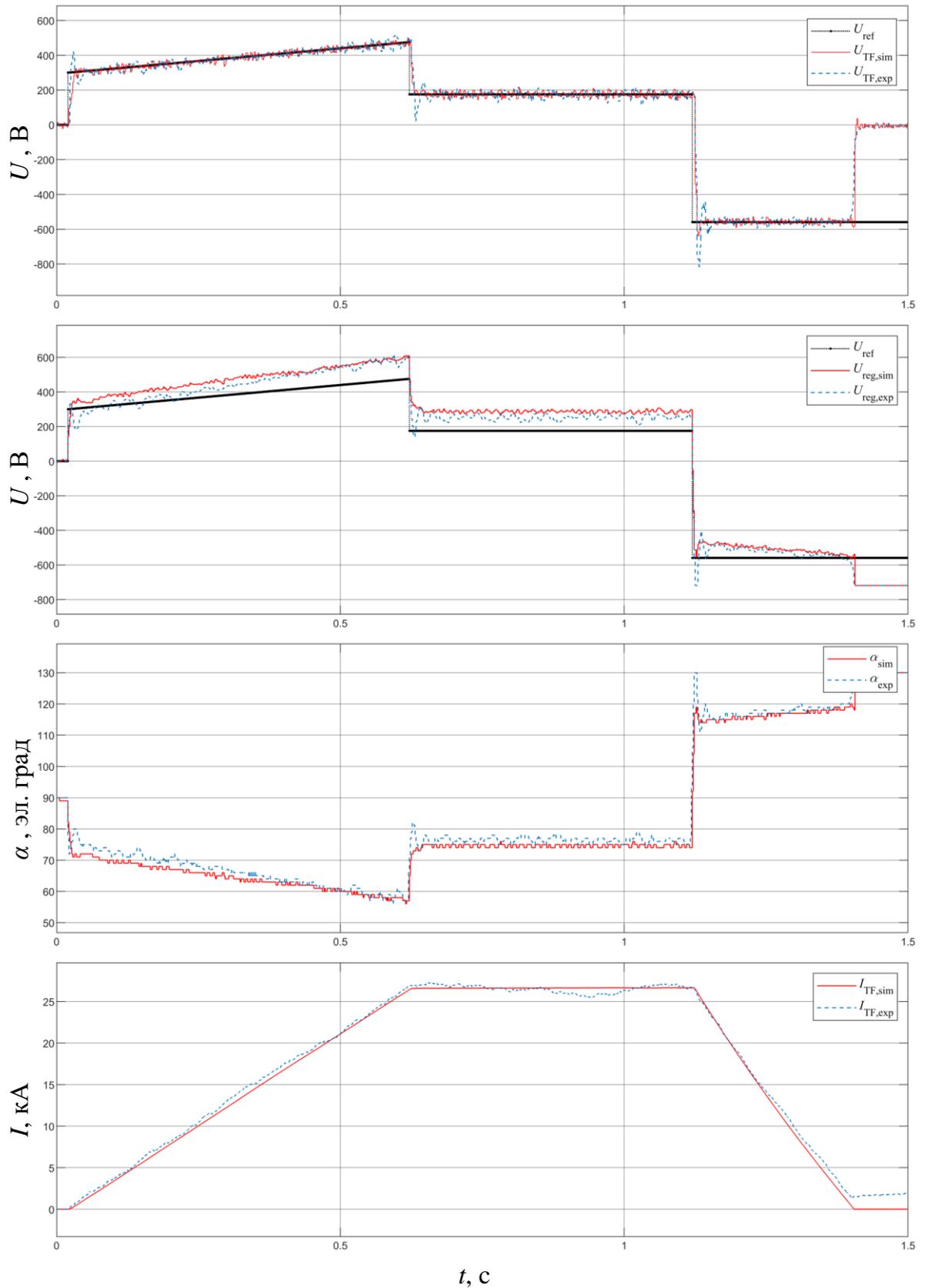


Рисунок 3.13 – Сравнение результатов моделирования ИП TF ($U_{TF,sim}$, $U_{reg,sim}$, α_{sim} и $I_{TF,sim}$) с экспериментальными данными разряда ($U_{TF,exp}$, $U_{reg,exp}$, α_{exp} и $I_{TF,exp}$) [5]

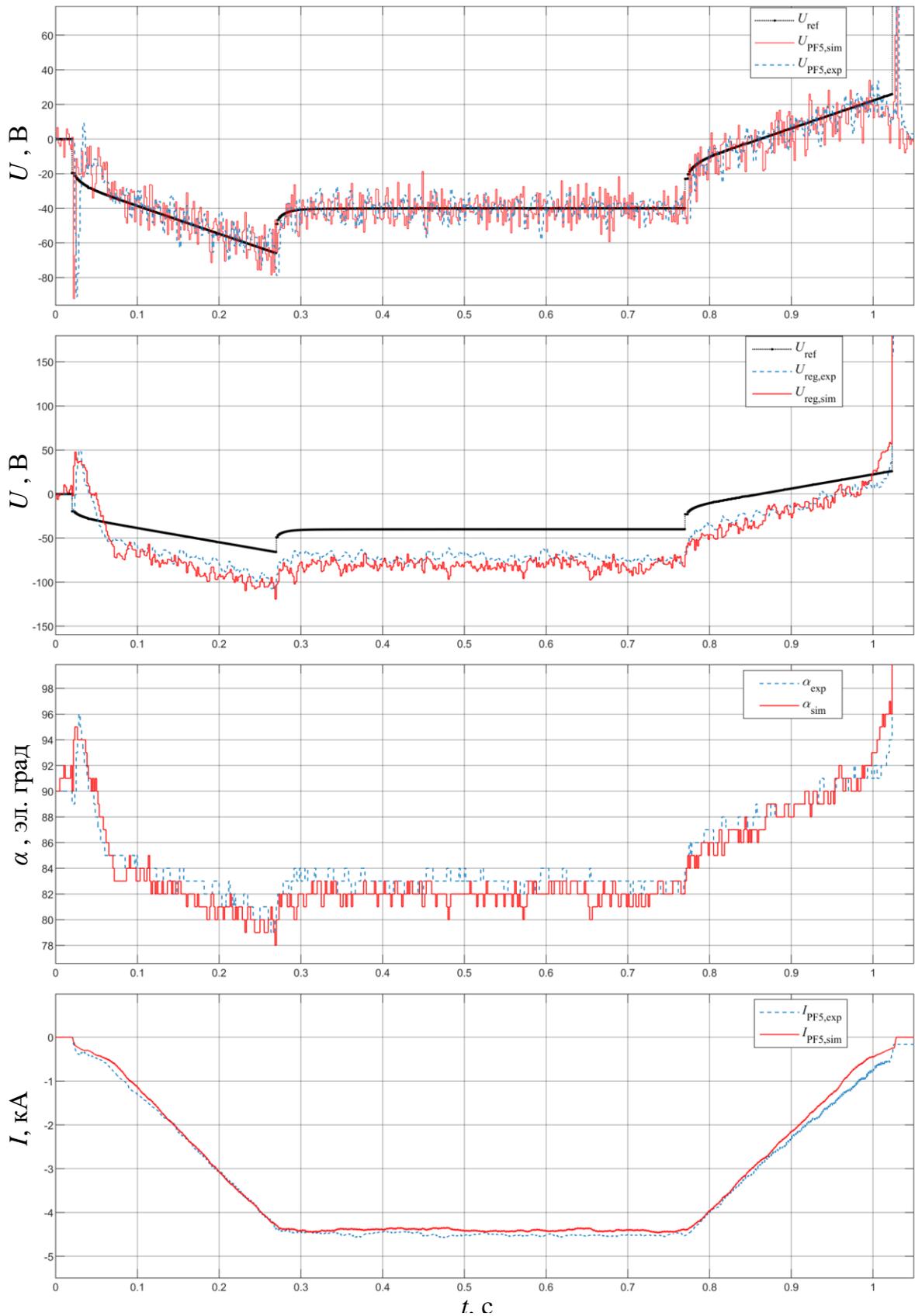


Рисунок 3.14 – Сравнение результатов моделирования ИП PF5 ($U_{PF5,sim}$, $U_{reg,sim}$, α_{sim} и $I_{PF5,sim}$) с экспериментальными данными разряда ($U_{PF5,exp}$, $U_{reg,exp}$, α_{exp} и $I_{PF5,exp}$) [5]

На графиках, представленных на рисунках 3.12, 3.13 и 3.14: U_{ref} – уставка напряжения, U_{sim} и U_{exp} – выходное напряжение ИП, полученное в ходе моделирования и эксперимента, $U_{\text{reg,sim}}$ и $U_{\text{reg,exp}}$ – выходная координата регулятора полученная в ходе моделирования и эксперимента, α_{sim} и α_{exp} – угол управления полученный в ходе моделирования и эксперимента, I_{sim} и I_{exp} – ток в обмотках ЭМС КТМ полученный в ходе моделирования и эксперимента соответственно [5].

В целом можно констатировать хорошую корреляцию модельных и экспериментально полученных данных. На плато напряжения и тока в течении разряда разница в углах управления α_{sim} и α_{exp} составляет 1° – 3° , что соответствует особенности асинхронно работающих цифровых устройств СЦУ (МУП, ПИТ, БСПС и др.).

Различие между выходной координатой регулятора U_{reg} и напряжением на выходе ИП U (График № 2 на рисунках 3.12, 3.13 и 3.14) объясняется суммой падений напряжений: ΔU_X – индуктивного падения напряжения в цепи коммутации, ΔU_R – активного падения напряжения контура, ΔU_B – падения напряжения на силовых полупроводниковых приборах преобразователей [5].

Необходимо отметить, что неточность работы в 1° – 3° связки СИФУ (МУП), БСПС и других асинхронно работающих цифровых устройств СЦУ носит системный характер и довольно эффективно нивелируется реализованной системой управления выходным напряжением ИП [5]. Вместе с этим, при фиксированном значении угла управления α в выходном напряжении всех источников питания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ регистрируются колебания треугольной формы («биения» [66]), связанные с дрейфом сигнала синхронизации БСПС в рамках 1° .

Примером может служить осциллограмма напряжения источника питания обмотки CS, изображенная на рисунке 3.15. Данная осциллограмма получена в ходе разряда № 3419, при фиксированном значении угла управления 80° .

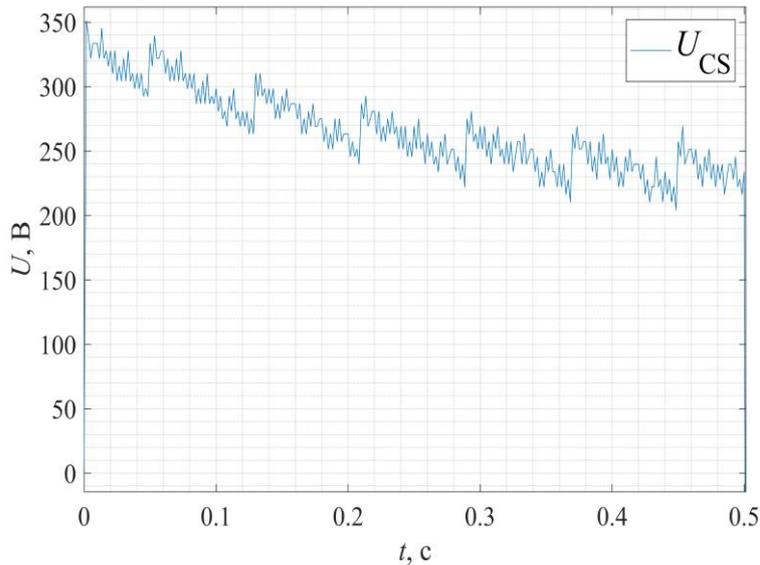


Рисунок 3.15 – Осциллограмма напряжения ИП CS при $\alpha = 80^\circ$

Как видно из рисунка 3.15, амплитуда колебаний составляет приблизительно 40 В, что характерно изменению угла управления в 1° для ИП обмотки CS. Данные колебания также имеют системную основу и не приводят к заметному ухудшению качества управления выходным напряжением ИП.

Вышеуказанные особенности СЦУ ИП обмоток ЭМС КТМ приводят к расхождению углов управления α (до 2° – 3°) и выходных координат регулятора U_{reg} , полученных в ходе реальных разрядов и модельных экспериментов. В этой связи, различия в углах управления α_{sim} и α_{exp} до 3° при сопоставлении экспериментальных и модельных данных можно считать приемлемым.

Учитывая существенную нелинейность статических и динамических характеристик источников импульсного электропитания токамака КТМ, в качестве основного показателя качества управления принята интегральная оценка точности воспроизведения сценария изменения средневыхпрявленного напряжения на обмотках ЭМС КТМ, рассчитанная с использованием соотношения:

$$\sigma_U = \frac{100\%}{2U_{d0}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_{ref}(t) - U_d(t))^2 dt}, \quad (3.18)$$

где: U_d – средневыхпрявленное напряжение ИП, U_{ref} – диаграмма изменения уставки напряжения, T – время разряда, U_{d0} – номинальное напряжение ИП. Показатель σ_U определен в % как среднеквадратичная ошибка регулирования на заданном интервале времени от всего теоретически доступного диапазона изменения

напряжения ИП, т.е. $2U_{d0}$, что соответствует диапазону углов управления α от 0° до 180° .

Интегральная оценка точности воспроизведения сценария тока в обмотке при этом может быть вычислена как:

$$\sigma_I = \frac{100\%}{2I_0} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_{ref}(t) - I_d(t))^2 dt}, \quad (3.19)$$

где: I_d – ток в обмотке, I_{ref} – диаграмма изменения уставки тока, I_0 – номинальный ток ИП во всем допустимом диапазоне.

Исходя из условий осуществимости и стабильности поддержания плазменного разряда для КТМ показатели σ_U и σ_I на этапе разряда не должны превышать 5 %. Значения σ_U , полученные в ходе наладочных работ на трех различных конструктивно и охватывающих требуемую номенклатуру ИП КТМ (см. рисунки 3.12, 3.13 и 3.14) приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Точность управления напряжением при наладке ИП TF, CS, PF5 КТМ

ИП	$\sigma_U, \%$	
	Модель	Эксперимент
TF	2,3	2,6
CS	0,9	0,8
PF5	0,8	0,7

Успешно проведенные наладочные работы с включением источников импульсного электропитания токамака КТМ в режиме регулирования напряжения на обмотках электромагнитной системы и соответствующие электротехнические испытания силового электрооборудования, освещенные во второй главе, позволили

окончательно утвердить структуру системы электропитания комплекса КТМ, как исполнительного механизма системы управления плазмой, а также структуру её СЦУ [5].

На рисунке 3.16 представлен итоговый вариант структурной схемы СИЭП токамака КТМ, совместно с её СЦУ.

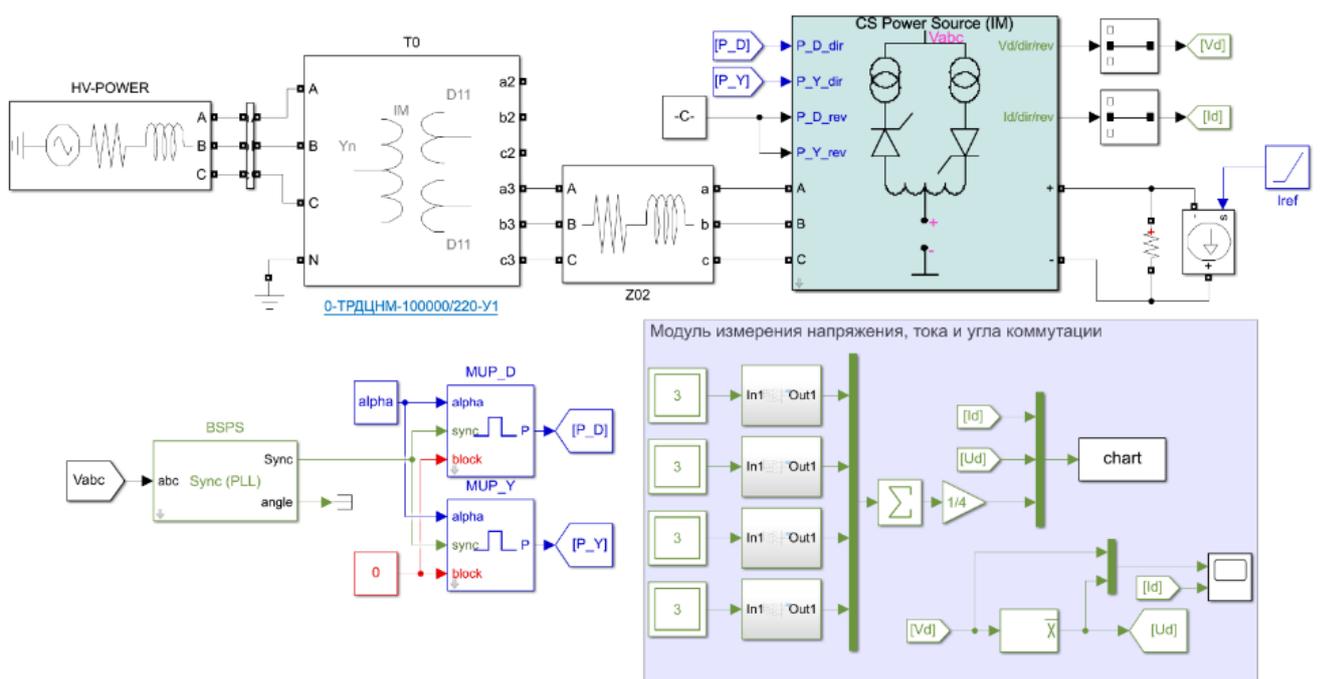


Рисунок 3.17 – Simulink/Simscapе модель ИП обмотки CS для измерения внешних характеристик $U_d = f(\alpha, I_d)$ и угла коммутации $\gamma = f(\alpha, I_d)$

Результаты обработки данных, полученных при расчёте внешних характеристик и углов коммутации ИП обмоток CS, TF и PF4 отображены в Приложении В на рисунках В.1, В.2 и В.3. Поскольку номинальный ток ИП обмотки PF4 (как и PF5) в два раза выше чем у ИП PF1, PF2, PF3 и PF6 и составляет 30 кА – все рассчитанные характеристики ИП PF4 справедливы для всех ИП обмоток PF.

Из анализа номограмм, представленных на рисунках В.1, В.2 и В.3 следует, что ИП обмоток PF1-PF3 и PF6 в пределах номинальных характеристик всегда будут работать в Режиме № 1 ($\gamma < 30^\circ$). ИП TF, PF4 и PF5 могут работать как в Режиме №1, так и в Режиме № 2 ($\gamma < 30^\circ$ и $\gamma = 30^\circ$ соответственно), Режим с $\gamma = 30^\circ$ показан толстой линией. ИП обмотки CS может работать в Режиме № 3 ($\gamma > 30^\circ$). Внешняя характеристика ИП (выходное напряжение) при работе в Режиме № 2 и № 3 с ростом тока в нагрузке искажается намного быстрее.

Номограммы угла коммутации γ ограничены сверху огибающей вида $\alpha + \gamma = 180^\circ$ (предельный случай, согласно (3.7), при $\delta = 0$). В этой связи, данные

номограммы могут быть использованы при расчете величины максимально возможного угла управления α_{\max} при конкретном значении тока в обмотке электромагнитной системы токамака КТМ.

Наряду с этим, анализ номограмм выходных характеристик ИП ЭМС КТМ выявил существование докритического режима работы в области относительно малых токов в нагрузке ($<I_{\text{кр}}$) для всех ИП обмоток PF. На рисунке 3.18 приведена номограмма с внешней характеристикой ИП обмотки PF4 с докритическим и нормальным режимом работы в зависимости от тока в нагрузке и текущего угла управления.

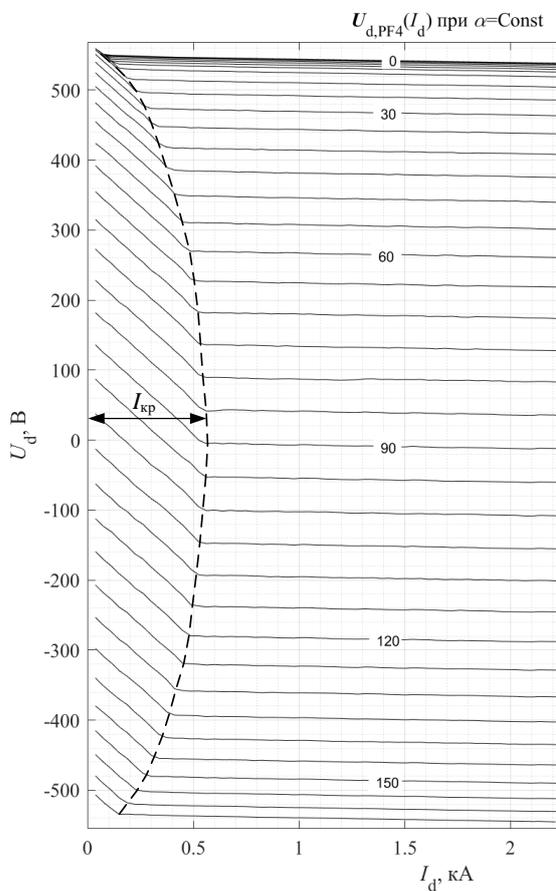


Рисунок 3.18 – Внешняя характеристика ИП PF4 в области докритического и нормального режимов работы

Из номограммы видно, что наиболее обширная зона докритического режима работы формируется при угле управления α около 90° и значении тока в нагрузке менее 600 А.

Данный режим характерен для схем компоновки многофазных источников питания с наличием уравнивающего реактора и сдвига пульсаций напряжения по фазе в звене постоянного тока. Причины возникновения такого режима подробно освещены в [68]. Необходимо отметить, что работа ИП в таком режиме несколько ухудшает управляемость ИП, что видно на рисунках 3.12, 3.13 и 3.14, при относительно малых значениях тока в обмотках в начале и в конце плазменного разряда.

3.8 Реализация комплексной аналитической модели системы электропитания токамака КТМ. Верификация модели и алгоритмов управления

На рисунке 3.19 представлена полная аналитическая модель системы питания токамака КТМ, позволяющая моделировать базовые сценарии разряда с замкнутой системой управления выходными напряжениями ИП обмоток ЭМС КТМ [5].

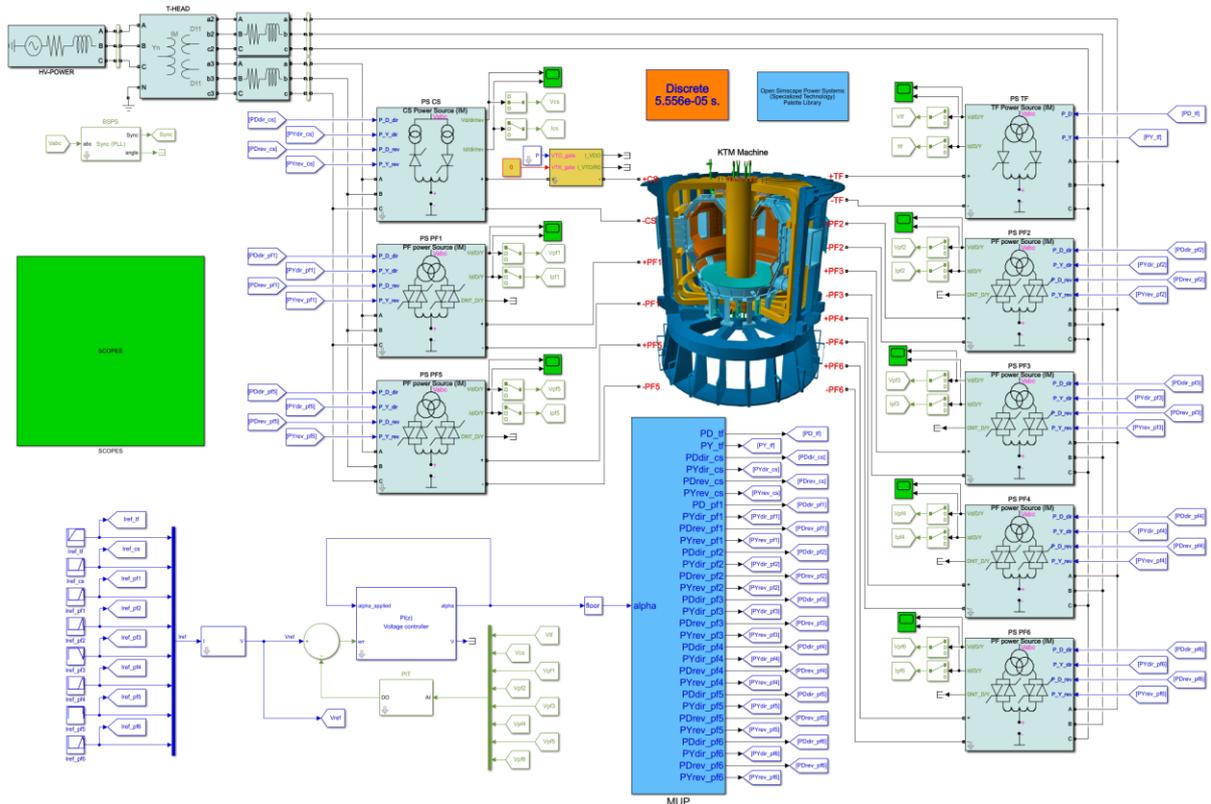


Рисунок 3.19 – Комплексная аналитическая модель СИЭП токамака КТМ

Данная модель позволяет:

- Моделировать требуемые сценарии разряда с различными входными данными (напряжения и углы управления), учитывая все необходимые особенности системы электропитания токамака КТМ;
- Оценивать физическую реализуемость сценариев, а также точность воспроизведения заданных диаграмм. Выявлять опасные сценарии, которые могут привести к аварийным ситуациям на дорогостоящем силовом электрооборудовании;

– Решать задачу синтеза регулятора тока в магнитно-связанных обмотках ЭМС КТМ;

– Обучать и тренировать обслуживающий персонал электротехнического комплекса КТМ и соответствующей СЦУ и многое другое.

На рисунках В.4 и В.5 представлены графики сравнения компьютерного моделирования и экспериментально полученных данных в разряде № 3575, проведенном в рамках завершающего этапа физического пуска установки КТМ, успешно реализованного 20 ноября 2019 года [5].

На рисунках В.4 и В.5 отображены осциллограммы напряжений $U(t)$: (ref) – уставка, (sim) – смоделированное напряжение ИП, (exp) – экспериментально полученное напряжение ИП; диаграммы угла управления $\alpha(t)$: (sim) – смоделированные, (exp) – полученные экспериментально; осциллограммы токов в обмотках ЭМС $I(t)$: (sim) – полученные при моделировании, (exp) – полученные экспериментально.

Интегральная оценка точности воспроизведения сценария изменения напряжения и тока в обмотках ЭМС для разряда № 3575, реализованного на физическом пуске КТМ, рассчитанная с использованием соотношений (3.18) и (3.19), приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Показатели качества управления в разряде № 3575

ИП	$\sigma_U, \%$		$\sigma_I, \%$	
	Модель	Эксперимент	Модель	Эксперимент
TF	2,2	2,6	0,5	1,2
CS	3,7	4,8	0,7	0,6
PF1	2,6	4,0	0,4	0,3
PF2	3,4	4,1	3,2	3,2
PF3	2,8	3,8	0,2	0,3
PF4	2,9	4,6	0,9	0,4
PF5	3,2	3,8	1,2	1,4
PF6	3,0	4,1	3,0	2,1

3.9 Выводы по главе

Данная глава посвящена разработке комплексной аналитической компьютерной модели системы электропитания обмоток ЭМС токамака КТМ в среде Simulink/Simscape системы Matlab совместно с её СЦУ, разработке и верификации соответствующих алгоритмов управления и диагностики.

В главе представлено детальное описание структуры, моделируемой СЦУ СИЭП обмоток ЭМС токамака КТМ, приведен перечень используемого в её составе оборудования и описаны его функции. Приведено математическое описание разработанных алгоритмов диагностики преобразовательного оборудования СИЭП токамака КТМ. Доработан, верифицирован и внедрен алгоритм импульсно-фазового управления преобразователями ИП обмоток ЭМС токамака КТМ [5].

В целях разработки эффективных и безопасных алгоритмов управления, а также уточнения режимов работы ИП обмоток ЭМС токамака КТМ проведено исследование их статических и динамических характеристик. Определены четыре существенно различающихся режима работы тиристорных преобразователей в составе ИП, границы которых определяются значением угла коммутации γ , зависящим от величины тока в нагрузке и текущего угла управления $\gamma = f(\alpha, I_d)$. Во избежание возможных аварийных ситуаций обозначена необходимость ограничения диапазона изменения угла управления α , приведены расчетные соотношения для вычисления границ допустимого диапазона. Выявлено что статические и динамические параметры ИП токамака КТМ существенно нелинейные, что необходимо учитывать в процессе синтеза замкнутой СУ напряжением на выходе ИП в целях обеспечения её устойчивости [5].

Учитывая, что основным режимом работы (без использования вышестоящей системы управления плазмой) для СЦУ СИЭП токамака КТМ является регулирование средневыврявленного напряжения на нагрузке - реализован соответствующий контур автоматического управления. Представлена и описана функциональная схема САУ напряжением ИП обмоток ЭМС токамака КТМ,

определены структура и основные требования к синтезируемому на базе контроллера СЦУ цифровому регулятору [5].

Реализован синтез цифрового регулятора выходного напряжения ИП обмоток ЭМС токамака КТМ. Приведены основные соотношения, описывающие синтезированный регулятор, а также используемые в работе методы его настройки. На основе критерия оптимального модуля рассчитаны первоначальные параметры настройки синтезированного цифрового ПИ-регулятора напряжения. С целью уточнения параметров настройки регулятора в среде Simulink/Simscape был проведен ряд экспериментов с использованием аналитической модели ИП токамака КТМ. Окончательные параметры настройки цифрового регулятора напряжения, удовлетворяющие предъявленным требованиям по качеству регулирования, были загружены в СЦУ при проведении комплексной наладки СИЭП токамака КТМ с включением ИП на обмотки ЭМС. Принимая во внимание сложность системы электропитания обмоток ЭМС токамака КТМ и соответствующей СЦУ, их распределенный характер, при реализации компьютерной аналитической модели систем разработана специализированная библиотека модулей Simulink/Simscape, с использованием которой были построены модели отдельных ИП [5].

Для проверки адекватности разрабатываемой компьютерной модели, а также правильности определенных ранее параметров настройки цифрового регулятора напряжения была проведена соответствующая серия экспериментов, показавшая хорошую корреляцию экспериментальных данных, полученных в реальных разрядах токамака КТМ и данных, полученных при компьютерном моделировании ИП обмоток ЭМС КТМ в режиме регулирования напряжения [5].

Поскольку разработанные модели ИП обмоток ЭМС КТМ были признаны адекватными, это позволило использовать их в дальнейшем для расчета внешней характеристики ИП - $U_d(\alpha, I_d)$, угла коммутации $\gamma(\alpha, I_d)$ и определения границ режимов работы соответствующих ИП. При помощи компьютерного моделирования для каждого типа ИП обмоток ЭМС токамака КТМ были построены соответствующие номограммы и выявлены все возможные режимы, в

которых данные ИП могут работать. Вместе с этим, анализ номограмм выявил существование докритического режима работы в области относительно малых токов в нагрузке ($<I_{кр}$) для всех ИП обмоток РФ. Данный режим характерен для схем компоновки ИП с наличием уравнивающего реактора и, к сожалению, несколько ухудшает управляемость ИП в соответствующем диапазоне изменения угла управления и тока в нагрузке [5].

В целях реализации необходимого сценария изменения тока (в том числе достижения требуемой производной) в обмотке CS ЭМС токамака КТМ в момент инициации разряда и роста тока плазмы, а также минимизации потребляемой из сети электропитания мощности предложен, описан, верифицирован и внедрен алгоритм управления ИП обмотки CS, сочетающий в себе совместный и отдельный режим управления встречно-направленными комплектами ТП в режиме реверсирования тока в нагрузке с использованием ключа-прерывателя постоянного тока в контуре электропитания.

На основе разработанных ранее моделей отдельных ИП обмоток ЭМС токамака КТМ реализована и верифицирована комплексная Simulink/Simscape модель СИЭП КТМ совместно с её СЦУ. Завершающий этап физического пуска установки КТМ, успешно реализованный 20 ноября 2019 года, показал хорошую корреляцию модельных и экспериментально полученных данных, что демонстрирует адекватность комплексной модели СИЭП КТМ, эффективность разработанного математического и информационного обеспечения СЦУ, а также работоспособность СИЭП токамака КТМ в целом [1, 5].

Приведенная интегральная оценка точности воспроизведения сценария изменения напряжения и тока в обмотках ЭМС в ходе моделирования и реального эксперимента при наладке ИП и проведении физического пуска установки КТМ не превысила 5 %, что регламентирует осуществимость и стабильность поддержания плазменного разряда в установке КТМ.

Глава 4. Разработка и верификация противоаварийных алгоритмов и алгоритмов по приведению системы электропитания комплекса КТМ в безопасное состояние

4.1 Анализ системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ и её компонентов

Учитывая материальную стоимость установки КТМ, стоимость и установленную мощность оборудования электротехнического комплекса, сложность электротехнических процессов, протекающих в контурах электропитания обмоток ЭМС токамака КТМ, опасность и возможные последствия аварийных ситуаций, связанных с электроэнергетическим комплексом - становится очевидной необходимость создания специализированной системы противоаварийной защиты, разработки и безопасной верификации эффективных противоаварийных алгоритмов и алгоритмов приведения оборудования комплекса в безопасное состояние [75].

Система противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ представляет собой сложную, распределенную систему, объединяющую в своем составе все необходимые для ликвидации аварийных ситуаций исполнительные механизмы (коммутационные аппараты и иное электротехническое оборудование), датчики и первичные преобразователи, контролирующие параметры и режимы работы оборудования, а также различные контроллеры и микропроцессорные устройства защиты, непосредственно реализующие логику работы системы [75].

На рисунке 4.1 представлена структурная схема системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ. Система ограничена «сверху», со стороны питающей сети 220 кВ - элегазовым выключателем ВГТ-220П*-40/2500У1 (на схеме обозначен как В-220-Т-1) и его устройством управления Сириус-УВ, «снизу» – обмотками электромагнитной системы токамака КТМ [75].

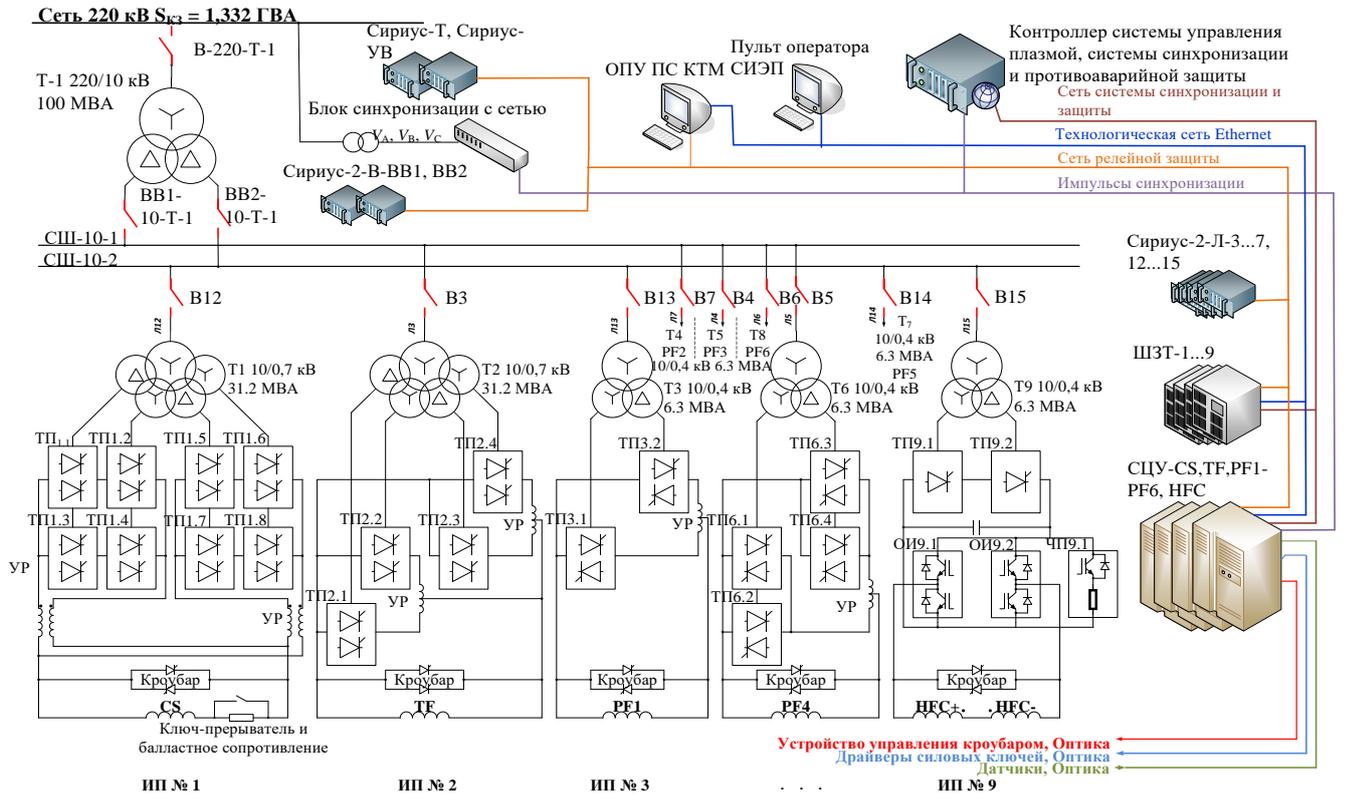


Рисунок 4.1 – Структурная схема системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ

Как видно из рисунка 4.1 оборудование ОРУ 220 кВ, как и головной трансформатор подстанции КТМ 220/10 кВ 100 МВА (ТРДЦНМ-100000/220-У1), контролируется устройствами релейной микропроцессорной защиты Сириус-Т, Сириус-УВ и блоком синхронизации преобразовательного оборудования КТМ с питающей сетью БСПС. При возникновении аварийной ситуации на ОРУ 220 кВ аварийное отключение и локализация аварии происходит отключением В-220-Т-1 и двумя вводными вакуумными выключателями для секций шин 10 кВ – ВВ1-10-Т1, ВВ2-10-Т-1. Вводные выключатели СШ-10-1 и СШ-10-2 контролируются блоками микропроцессорных защит Сириус-2-В (ВВ1 и ВВ2) и служат также для отключения нагрузки в случае аварийных процессов на шинах 10 кВ [75].

Каждый источник импульсного электропитания обмоток КТМ (ИП №1...ИП №9) присоединен к шинам 10 кВ через свой отдельный вакуумный выключатель (В3...В7, В12...В15), которые в свою очередь контролируются блоками микропроцессорных защит Сириус-2-Л (3...7, 12...15). При возникновении

аварийной ситуации на отходящих линиях 10 кВ - отключение линии и локализация аварии происходит отключением вышеуказанных выключателей [75].

Источники импульсного электропитания представляют собой электротехнический комплекс, состоящий из двух согласующих (понижающих) трансформаторов мощностью 31,2 МВА (ТДЦНП-50000/10НВУ1) на напряжение 10/0,7 кВ (Т1 и Т2) и семи понижающих трансформаторов мощностью 6,3 МВА (ТДНП-12500/10 У1) на напряжение 10/0,4 кВ (Т3...Т9) от которых питается соответствующее преобразовательное оборудование. Параметры работы каждого согласующего трансформатора и его нагрузки контролируется специализированными устройствами микропроцессорной защиты ШЗТ (1...9) [75].

Преобразовательный комплекс СИЭП КТМ включает в себя: 30 тиристорных преобразователей, установленная мощность каждого из которых рассчитана на 15 МВт (ТП); ключ-прерыватель постоянного тока на 30 кА в составе ИП обмотки СS; инвертор напряжения, рассчитанный на мощность 3 МВт при частоте коммутации 1 кГц в составе источника питания обмоток НФС (ОИ); уравнительную и ограничительную реакторную группу (УР) и другое электротехническое оборудование. На выходе каждого источника питания предусмотрен управляемый кробоар, необходимый для шунтирования обмотки электромагнитной системы КТМ в случае превышения уровня напряжения и аварийного вывода запасенной в ней энергии в случае потери управляемости основным преобразовательным оборудованием [75].

Оборудование преобразовательного комплекса КТМ контролируется системой цифрового управления источниками импульсного электропитания (контроллеры СЦУ-CS, TF, PF1...PF6, НФС). Для достижения требуемой логики работы системы в целом, а также необходимого уровня быстродействия - все устройства микропроцессорной защиты, контроллеры СЦУ и контроллер системы противоаварийной защиты комплекса КТМ связаны между собой технологическими сетями [75].

4.2 Анализ возможных аварийных ситуаций, алгоритмизация комплекса противоаварийных мер

Учитывая специфику технологического процесса в установках типа токамак - аварийные ситуации должны ликвидироваться по принципу минимизации возможного ущерба, как от последствия самой аварии, так и от последствия ликвидации и локализации этой аварии для основного технологического оборудования установки КТМ (срыв плазмы, перенапряжения на обмотках электромагнитной системы при неконтролируемом отключении источников питания от сети и нагрузки). При этом, комплекс противоаварийных мер должен быть направлен на скорейшее и эффективное устранение аварии, приведение оборудования в безопасное состояние и по возможности на сохранение при этом ресурса, используемого электротехнического и коммутационного оборудования. В целом, для эффективной реализации противоаварийных алгоритмов большое значение имеют - момент возникновения аварии (до или после начала плазменного разряда), а также локализация и степень тяжести аварии (скорость развития аварийных процессов, стойкость к воздействию токов короткого замыкания, диэлектрическая прочность изоляции и т.п.) [75].

В этой связи, были проанализированы все возможные и детектируемые для комплекса КТМ типы аварий и с учетом всех вышеописанных критериев, принципов и факторов, возможностей аппаратного обеспечения СПЗ, возможностей коммутационного и иного электротехнического оборудования - разработаны оптимальные алгоритмы ликвидации аномальных режимов работы оборудования, аварийных ситуаций и их последствий [75].

На рисунке Г.1 представлена блок-схема алгоритма противоаварийного управления и приведения электротехнического оборудования комплекса КТМ в безопасное состояние. Как видно из рисунка в зависимости от точки локализации и типа аварии – необходимые действия для ликвидации конкретной аварийной ситуации разнятся. Контроллер системы противоаварийной защиты реализует

функцию централизации учета и синхронизации выдачи управляющих команд для всех противоаварийных действий системы.

При аварии выключателя В-220-Т-1, отключении внешнего электропитания 220 кВ со стороны питающей электросети, превышения уставок по току для оборудования ОРУ 220 кВ, исчезновении импульсов синхронизации, отключения питания ШДУ головного трансформатора Т-1 220/10 кВ, низком уровне масла Т-1, срабатывании газовой защиты Т-1, срабатывании тепловой защиты Т-1, срабатывании дифференциальной защиты Т-1, превышении уставок по току для Т-1 - происходит отключение выключателя В-220-Т-1. В случае если авария произошла после начала старта разряда – энергия, запасенная в обмотках электромагнитной системы КТМ не может быть выведена в сеть штатно переводом преобразователей системы импульсного электропитания в режим инвертирования. Вывод энергии происходит посредством шунтирования обмоток электромагнитной системы защитными кроубарами [75].

В случае возникновения аварийной ситуации на вводных выключателях ВВ1-10-Т-1, ВВ2-10-Т-1, превышения уставок по току для СШ-10-1, СШ-10-2 – происходит отключение конкретного вводного выключателя. Если аварийное отключение произошло после начала старта разряда – вывод запасенной энергии из обмоток, питающихся от источников питания аварийной секции шин происходит посредством шунтирования данных обмоток защитными кроубарами. В это же время для источников импульсного электропитания, подключенных к работоспособной секции шин формируется сигнал на инвертирование запасенной в обмотках электромагнитной системы КТМ энергии в сеть (для источника питания обмотки НФС – включение чоппера звена постоянного тока инвертора) [75].

При авариях линейных выключателей В3...В7, В12...В15, превышении уставок по току отходящих к согласующим трансформаторам линий 10 кВ Л3...Л7, Л12...Л15, отключении питания ШДУ согласующих трансформаторов Т1...Т9, низком уровне масла для Т1...Т9, срабатывании газовой защиты трансформаторов Т1...Т9, срабатывании тепловой защиты трансформаторов Т1...Т9, срабатывании дифференциальной защиты трансформаторов Т1 и Т2, превышении уставок по току

для трансформаторов Т1...Т9, аварии РПН трансформаторов Т1...Т9 – происходит отключение конкретного линейного выключателя 10 кВ. В случае если аварийное отключение выключателя произошло после начала старта разряда – вывод запасенной энергии из обмотки, питающейся от источника питания, подключенного к аварийному выключателю, происходит посредством шунтирования данной обмотки защитным кроубаром. По аналогии с описанной выше аварией - в это же время для работоспособных источников питания формируется сигнал на инвертирование запасенной в обмотках электромагнитной системы КТМ энергии в сеть [75].

В случае аварий, связанных с аномальными режимами работы преобразовательного оборудования системы импульсного электропитания, обмоток электромагнитной системы установки КТМ, а именно – падением ниже уровня уставки расхода охлаждающей воды через обмотки ЭМС КТМ, превышением температуры охлаждающей воды на выходе обмоток ЭМС, превышением уровня уставки времени работы источников питания СИЭП, превышением уставок оборудования СИЭП по току и напряжению, выявлением значительного дисбаланса токов и напряжений в параллельно и последовательно соединенных преобразователях СИЭП и их плечах, превышением уровня уставки величины уравнивающих токов в источниках электропитания, выявлением нагрева выше уровня уставки полупроводниковых приборов оборудования СИЭП – для всех источников импульсного электропитания формируется команда на инвертирование запасенной в обмотках электромагнитной системы КТМ энергии в сеть [75].

При возникновении аварийной ситуации в системе цифрового управления конкретного источника питания после начала разряда - вывод запасенной энергии из обмотки, питающейся от аварийного источника питания, происходит посредством шунтирования данной обмотки защитным кроубаром. В случае превышения уровня напряжения на выходе конкретного источника питания электромагнитной системы КТМ (на клеммах обмотки) выше уровня уставки защитный кроубар срабатывает автономно. Система противоаварийной защиты

отключает линейный выключатель 10 кВ, питающий согласующий трансформатор данного источника питания и переводит систему цифрового управления этого источника питания в режим останова. Параллельно с этим, на всех работоспособных источниках питания формируется команда на инвертирование запасенной в обмотках электромагнитной системы КТМ энергии в сеть.

В конце реализации всех вышеперечисленных противоаварийных алгоритмов источники питания переходят в режим останова со снятием управляющих импульсов с полупроводниковых приборов [75].

4.3 Формализация алгоритма противоаварийного управления и разработка модели соответствующей дискретно-событийной системы

При анализе описания алгоритма противоаварийного управления системы электропитания токамака КТМ становится очевидным что данная система относится к распределенной реактивной дискретно-событийной системе. Это обосновано топологией построения системы, логикой её работы и характером непрерывного взаимодействия между отдельными компонентами [75]. Обычно, в структуре реактивных систем можно выделить несколько подсистем и их взаимодействие будет является некоторой частью общего взаимодействия системы с её окружением [76]. Большое внимание построению и верификации реактивных систем уделено в трудах профессора А.А. Шалыто [77]. Теория дискретно-событийных систем, их проектирования, моделирования и верификации впервые была сформулирована В.М. Уонхэмом и Дж. Г. Рамаджом [78].

В целях безопасной верификации и внедрения алгоритма управления системы противоаварийной защиты токамака КТМ его необходимо формализовать и представить в виде соответствующей модели для дальнейшего её исследования. Поскольку любая дискретно-событийная система может быть описана абстрактным автоматом - задача формализации таких систем в основном решается применением аппарата дискретной математики [75, 76, 77, 79, 80, 81, 82].

Абстрактным автоматом считается модель, которая описывается кортежем: $A = (X, Y, S, f_y, f_s, S_0)$, при этом в данном кортеже: X – множество сигналов на входе автомата, Y – множество сигналов на выходе, S – множество состояний автомата, причем все эти множества являются непустыми. Вместе с этим в кортеж входят характеристические функции автомата: f_y – функция выходов, f_s – функция переходов, а также элемент S_0 – начальное состояние автомата в момент времени $t = 0$ [75, 79].

Учитывая специфику системы противоаварийной защиты КТМ, конечное количество датчиков, исполнительных механизмов и детектируемых типов аварии - синтезируемый автомат будет являться конечным [79].

Фактор дискретного времени, в котором автомат функционирует (представляет собой ряд целых неотрицательных чисел) имитируется посредством вектора состояний S , который выполняет функцию памяти, поскольку, в зависимости от текущего состояния автомата, на один конкретный определенный входной сигнал (компоненты вектора X) автомат будет выдавать различные выходные сигналы (компоненты вектора Y) [79].

Характеристическая функция f_s реализует бинарное отношение $S \times X \rightarrow S$, то есть соотносит каждой паре состояние – входной сигнал строго определенное состояние автомата из множества S . Функция f_y реализует отношение вида $S \times X \rightarrow Y$, таким образом каждой паре состояние – выходной сигнал соотносит конкретный выходной сигнал автомата из множества Y [79].

Учитывая необходимость в минимизации времени реакции, а также повышения устойчивости системы противоаварийной защиты комплекса КТМ, алгоритм её работы будет формализован посредством синтеза автомата Мура (автомата II рода), который описывается следующей парой уравнений: $s^{\wedge}(t+1) = f_s^{\wedge}(x(t+1), s^{\wedge}(t)); y(t) = f_y^{\wedge}(s^{\wedge}(t))$, поскольку данный тип автомата по входному сигналу «опережает» на один условный дискретный шаг времени автомат I рода (или автомат Мили) [75, 79].

Синтез (формализация) автомата реализуется посредством разработки соответствующей математической модели данного автомата на основе четко сформулированного алгоритма его функционирования. Поскольку математическая модель автомата описывается кортежем $A = (X, Y, S, f_y, f_s, S_0)$ - в процессе синтеза должны быть определены все компоненты данного кортежа. Учитывая, что в данном конкретном случае множества X, Y, S конечны - в процессе формализации будут определены и перечислены все элементы, входящие в эти множества. Характеристические функции автомата будут представлены табличным и графическим способами [75, 79].

При графическом способе представления каждой вершине орграфа соответствует определенное состояние автомата. Данная вершина помечается символом этого состояния S_i и символом выхода автомата (выходной переменной) Y_i в данный момент. Из текущего состояния автомата, под воздействием входного символа (входной переменной) X_i существует переход в состояние S_j , который обозначается соответствующей дугой. Поскольку дуги переходов имеют конкретные направления граф автомата является ориентированным [79].

В синтезированном в данной работе автомате Мура определены: возможных состояний ($S_i \in S$) - 51, интегрированных входных переменных ($X_i \in X$) - 133 и интегрированных выходных переменных ($Y_i \in Y$) - 51. Характеристические функции f_y и f_s синтезированного автомата Мура, выраженные через соответствие интегрированных переменных автомата значениям переменных, характеризующих входные и выходные сигналы системы противоаварийной защиты токамака КТМ представлены в таблицах 4.3 и 4.4 [75].

Описание переменных, характеризующих внутренние, входные и выходные сигналы системы противоаварийной защиты, контролируемых технологических параметров и событий, приводящих к изменениям данных переменных, а также места формирования сигналов представлены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 – Описание входных (и интегрированной - X0) переменных, характеризующих входные и внутренние сигналы системы противоаварийной защиты

Наим. вх./инт. переменной	Описание вх./инт. переменной	Описание контролируемых технологических параметров, несоответствие которых приводит к изменению переменной	Место формирования сигналов
X0	Отсутствие аварии (0 - нет, 1 - да)	Любая аварийная ситуация	Контроллер СПЗ;
x1	Авария ПС 220 кВ (0 - нет, 1 - да)	Авария выключателя В-220-Т-1, отключение питания 220 кВ со стороны питающей электросети ($U_{пит}=0$), превышение уставок по току ($I>I_{уст}$), исчезновение импульсов синхронизации, отключение питания ШДУ Т-1 220/10 кВ, низкий уровень масла Т-1 ($L=L_{min}$), срабатывание газовой защиты Т-1, срабатывание тепловой защиты Т-1 ($t>t_{уст}$), срабатывание дифференциальной защиты Т-1 ($I_{диф}>I_{уст}$), превышение уставок по току для Т-1 ($I>I_{уст}$)	Сириус-Т; Сириус-УВ; БСПС
x2	Авария вводного выключателя СШ-10-1 (0 - нет, 1 - да)	Авария выключателя ВВ1-10-Т-1, превышение уставок по току для СШ-10-1 ($I>I_{уст}$)	Сириус-2В-ВВ1
x3	Авария вводного выключателя СШ-10-2 (0 - нет, 1 - да)	Авария выключателя ВВ2-10-Т-1, превышение уставок по току для СШ-10-2 ($I>I_{уст}$)	Сириус-2В-ВВ2
x4...x12	Авария оборудования электропитания переменным током 10/0.7/0.4 кВ / авария ШЗТ для i-го источника СИЭП (0 - нет, 1 - да)	Авария выключателей В3...В7, В12...В15, превышение уставок отходящих линий 10 кВ Л3...Л7, Л12...Л15 по току ($I>I_{уст}$), отключение питания ШДУ согласующих трансформаторов Т1...Т9, низкий уровень масла Т1...Т9 ($L=L_{min}$), срабатывание газовой защиты Т1...Т9, срабатывание тепловой защиты Т1...Т9 ($t>t_{уст}$), срабатывание дифференциальной защиты Т1-Т2 ($I_{диф}>I_{уст}$), превышение уставок по току для Т1...Т9 ($I>I_{уст}$), авария РПН Т1...Т9	Сириус-2-Л-3...7, 12...15; ШЗТ-1...9
x13...x21	Аварийная ситуация для i-й обмотки ЭМС токамака КТМ / авария преобразовательного оборудования i-	Расход охлаждающей воды через обмотки ЭМС КТМ ниже уровня уставки ($F<F_{min}$), температура охлаждающей воды на выходе обмоток ЭМС больше уровня уставки ($t>t_{max}$), время работы источников питания СИЭП выше уровня уставки ($T>T_{max}$), превышение уставок оборудования СИЭП по току ($I>I_{max}$) и напряжению ($U>U_{max}$), дисбаланс токов ($DI>DI_{max}$) и напряжений	СЦУ- CS,TF,PF1- PF6,HFC; Технологическ ие контроллеры; Контроллер СПЗ

Наим. вх./инт. переменной	Описание вх./инт. переменной	Описание контролируемых технологических параметров, несоответствие которых приводит к изменению переменной	Место формирования сигналов
	го источника СИЭП (0 - нет, 1 - да)	($UD > UD_{max}$) в параллельно и последовательно соединенных преобразователях СИЭП и их плечах больше уровня уставки, величины уравнивающих токов в источниках электропитания выше уровня уставки ($I_{ур} > I_{уруст}$), нагрев (Джоулев интеграл) полупроводниковых приборов оборудования СИЭП больше уровня уставки	
x22...x30	Авария системы цифрового управления (СЦУ) i-го источника СИЭП (0 - нет, 1 - да)	Авария СЦУ i-го источника СИЭП, невозможность инвертирования тока нагрузки в сеть	СЦУ- CS,TF,PF1- PF6,HFC; Контроллер СПЗ
x31...x39	Напряжение на i-й обмотке ЭМС КТМ выше уровня уставки / кроубар i-го источника питания СИЭП сработал (0 - нет, 1 - да)	Напряжения на клеммах i-й обмотки ЭМС КТМ выше уровня уставки ($U > U_{max}$)	Кроубары CS,TF,PF1- PF6,HFC;
x40...x48	Флаги наличия тока в i-й обмотке ЭМС КТМ / начала работы i-го ИП СИЭП (0 - нет, 1 - да)	Наличие токов / запасенной энергии в i-й обмотке ЭМС КТМ, работа оборудования СИЭП под нагрузкой	СЦУ- CS,TF,PF1- PF6,HFC; Контроллер СУП и СПЗ;
x49	Квитирование аварийного сигнала операторами СИЭП и диспетчером ПС КТМ 220/10 кВ (оператором БЭУ) (0 - нет, 1 - да)	Квитирование	Пульт оператора СИЭП, диспетчер ПС КТМ 220/10 кВ
x50	Выключатель В-220-Т-1 включен (0 - нет, 1 - да)	Квитирование	Сириус-УВ;
x51	Выключатель ВВ1-10-Т-1 включен	Квитирование	Сириус-2В- ВВ1

Наим. вх./инт. переменной	Описание вх./инт. переменной	Описание контролируемых технологических параметров, несоответствие которых приводит к изменению переменной	Место формирования сигналов
	(0 - нет, 1 - да)		
x52	Выключатель ВВ2-10-Т-1 включен (0 - нет, 1 - да)	Квитирование	Сириус-2В-ВВ2
x53...x61	i-й линейный выключатель отходящей линии 10 кВ включен (Л3...Л7, Л12...Л15) (0 - нет, 1 - да)	Квитирование	Сириус-2-Л-3...7, 12...15;

Таблица 4.2 – Описание выходных (и интегрированной – Y0) переменных, характеризующих выходные и внутренние сигналы системы противоаварийной защиты

Наим. вых./инт. переменной	Описание выходной переменной	Место формирования сигналов
Y0	Считывание параметров оборудования, штатная эксплуатация (0 - нет, 1 - да)	Контроллер СПЗ;
y1	Отключить выключатель В-220-Т-1 ПС КТМ 220/10 кВ (0 - нет, 1 - да)	Сириус-УВ
y2	Отключить вводной выключатель ВВ1-10-Т-1 СШ-10-1 РУ-10 кВ (0 - нет, 1 - да)	Сириус-2В-ВВ1
y3	Отключить вводной выключатель ВВ2-10-Т-1 СШ-10-2 РУ-10 кВ (0 - нет, 1 - да)	Сириус-2В-ВВ2
y4...y12	Отключить i-й линейный выключатель (В3...В7, В12...В15) отходящей линии 10 кВ (Л3...Л7, Л12...Л15) (0 - нет, 1 - да)	Сириус-2-Л-3...7, 12...15;
y13...y21	Команда на инвертирование тока нагрузки в сеть для i-го источника питания СИЭП (для ИП №9 обмотки НФС - только включение чоппера в звене постоянного тока) (0 - нет, 1 - да)	СЦУ-CS,TF,PF1-PF6,НФС;
y22...y30	Команда на останов (снятие управляющих импульсов) для i-го источника питания СИЭП (0 - нет, 1 - да)	СЦУ-CS,TF,PF1-PF6,НФС;
y31...y39	Включение кроубара i-го источника питания СИЭП (0 - нет, 1 - да)	Контроллер СПЗ; ШЗТ-1...9;
y40	Выдача аварийного сигнала оператору СИЭП и диспетчеру ПС 220/10 КТМ (оператору БЭУ)	Контроллер СПЗ;

Наим. вых./инт. переменной	Описание выходной переменной	Место формирования сигналов
	(0 - нет, 1 - да)	
y41	Останов СПЗ, останов (снятие управляющих импульсов) для всех источников питания СИЭП (0 - нет, 1 - да)	Контроллер СПЗ;

Таблица 4.3 – Соответствие интегрированных переменных автомата Мура значениям переменных, характеризующих входные сигналы системы противоаварийной защиты

Интегрированная переменная	Входные сигналы/интегрированная переменная	Интегрированная переменная	Входные сигналы/интегрированная переменная
X0	$\overline{x1} \wedge \overline{x2} \wedge \overline{x3} \wedge (\overline{x4} \wedge \dots \wedge \overline{x12}) \wedge (x13 \wedge \dots \wedge x21) \wedge (x22 \wedge \dots \wedge x30) \wedge (x31 \wedge \dots \wedge x39)$	X67	$\overline{x56} \wedge x43$
X1	x1	X68	$\overline{x56} \wedge \overline{x43}$
X2	$\overline{x50} \wedge (x40 \vee \dots \vee x48)$	X69	$x16 \vee (x25 \wedge \overline{x7} \wedge \overline{x1} \wedge \overline{x2} \wedge x43 \wedge \overline{x0})$
X3	1	X70	x25
X4	1	X71	$\overline{x43}$
X5	$X0 \wedge x49 \wedge (\overline{x40} \wedge \dots \wedge \overline{x48})$	X72	$\overline{x25} \wedge x43$
X6	$\overline{x0} \vee (x40 \vee \dots \vee x48)$	X73	1
X7	$\overline{x50} \wedge (\overline{x40} \wedge \dots \wedge \overline{x48})$	X74	$x35 \vee x26$
X8	x2	X75	$x35 \wedge x57$
X9	$\overline{x51} \wedge (x41 \vee x43 \vee x44 \vee x45 \vee x47)$	X76	$\overline{x57} \wedge x35$
X10	1	X77	$x35 \wedge \overline{x57}$
X11	$x40 \vee x42 \vee x46 \vee x48$	X78	x8
X12	$\overline{x40} \wedge \overline{x42} \wedge \overline{x46} \wedge \overline{x48}$	X79	$\overline{x57} \wedge x44$
X13	1	X80	$\overline{x57} \wedge x44$
X14	$x22 \vee x24 \vee x28 \vee x30$	X81	$x17 \vee (x26 \wedge \overline{x8} \wedge \overline{x1} \wedge \overline{x2} \wedge x44 \wedge \overline{x0})$
X15	$\overline{x41} \wedge \overline{x43} \wedge \overline{x44} \wedge \overline{x45} \wedge \overline{x47}$	X82	x26
X16	$\overline{x40} \wedge \overline{x42} \wedge \overline{x46} \wedge \overline{x48}$	X83	$\overline{x44}$
X17	x3	X84	$\overline{x26} \wedge x44$
X18	$\overline{x52} \wedge (x40 \vee x42 \vee x46 \vee x48)$	X85	1

Интегрируемая переменная	Входные сигналы/интегрируемая переменная	Интегрируемая переменная	Входные сигналы/интегрируемая переменная
X19	1	X86	$x36 \vee x27$
X20	$x41 \vee x43 \vee x44 \vee x45 \vee x47$	X87	$x36 \wedge x58$
X21	$\overline{x41 \wedge x43 \wedge x44 \wedge x45 \wedge x47}$	X88	$\overline{x58 \wedge x36}$
X22	1	X89	$x36 \wedge \overline{x58}$
X23	$x23 \vee x25 \vee x26 \vee x27 \vee x29$	X90	$x9$
X24	$\overline{x40 \wedge x42 \wedge x46 \wedge x48}$	X91	$\overline{x58 \wedge x45}$
X25	$\overline{x41 \wedge x43 \wedge x44 \wedge x45 \wedge x47}$	X92	$\overline{x58 \wedge x45}$
X26	$x31 \vee x22$	X93	$x18 \vee (x27 \wedge x9 \wedge x1 \wedge x2 \wedge x45 \wedge \overline{x0})$
X27	$x31 \wedge x53$	X94	$x27$
X28	$\overline{x53 \wedge x31}$	X95	$\overline{x45}$
X29	$x31 \wedge \overline{x53}$	X96	$\overline{x27 \wedge x45}$
X30	$x4$	X97	1
X31	$\overline{x53 \wedge x40}$	X98	$x37 \vee x28$
X32	$\overline{x53 \wedge x40}$	X99	$x37 \wedge x59$
X33	$x13 \vee (x22 \wedge x4 \wedge x1 \wedge x3 \wedge x40 \wedge \overline{x0})$	X100	$\overline{x59 \wedge x37}$
X34	$x22$	X101	$x37 \wedge \overline{x59}$
X35	$\overline{x40}$	X102	$x10$
X36	$\overline{x22 \wedge x40}$	X103	$\overline{x59 \wedge x46}$
X37	1	X104	$\overline{x59 \wedge x46}$
X38	$x32 \vee x23$	X105	$x19 \vee (x28 \wedge x10 \wedge x1 \wedge x3 \wedge x46 \wedge \overline{x0})$
X39	$x32 \wedge x54$	X106	$x28$
X40	$\overline{x54 \wedge x32}$	X107	$\overline{x46}$
X41	$x32 \wedge \overline{x54}$	X108	$\overline{x28 \wedge x46}$
X42	$x5$	X109	1
X43	$\overline{x54 \wedge x41}$	X110	$x38 \vee x29$
X44	$\overline{x54 \wedge x41}$	X111	$x38 \wedge x60$
X45	$x14 \vee (x23 \wedge x5 \wedge x1 \wedge x2 \wedge x41 \wedge \overline{x0})$	X112	$\overline{x60 \wedge x38}$
X46	$x23$	X113	$x38 \wedge \overline{x60}$

Интегрируемая переменная	Входные сигналы/интегрируемая переменная	Интегрируемая переменная	Входные сигналы/интегрируемая переменная
X74	$\overline{x41}$	X114	$x11$
X48	$\overline{x23} \wedge x41$	X115	$\overline{x60} \wedge x47$
X49	1	X116	$\overline{x60} \wedge \overline{x47}$
X50	$x33 \vee x24$	X117	$x20 \vee (\overline{x29} \wedge \overline{x11} \wedge \overline{x1} \wedge \overline{x2} \wedge x47 \wedge \overline{x0})$
X51	$x33 \wedge x55$	X118	$x29$
X52	$\overline{x55} \wedge x33$	X119	$\overline{x47}$
X53	$x33 \wedge \overline{x55}$	X120	$\overline{x29} \wedge x47$
X54	$x6$	X121	1
X55	$\overline{x55} \wedge x42$	X122	$x39 \vee x30$
X56	$\overline{x55} \wedge \overline{x42}$	X123	$x39 \wedge x61$
X57	$x15 \vee (\overline{x24} \wedge \overline{x6} \wedge \overline{x1} \wedge \overline{x3} \wedge x42 \wedge \overline{x0})$	X124	$\overline{x61} \wedge x39$
X58	$x24$	X125	$x39 \wedge \overline{x61}$
X59	$\overline{x42}$	X126	$x12$
X60	$\overline{x24} \wedge x42$	X127	$\overline{x61} \wedge x48$
X61	1	X128	$\overline{x61} \wedge \overline{x48}$
X62	$x34 \vee x25$	X129	$x21 \vee (\overline{x30} \wedge \overline{x12} \wedge \overline{x1} \wedge \overline{x3} \wedge x48 \wedge \overline{x0})$
X63	$x34 \wedge x56$	X130	$x30$
X64	$\overline{x56} \wedge x34$	X131	$\overline{x48}$
X65	$x34 \wedge \overline{x56}$	X132	$\overline{x30} \wedge x48$
X66	$x7$	X133	1

Таблица 4.4 – Соответствие интегрированных переменных автомата Мура значениям переменных, характеризующих выходные сигналы системы противоаварийной защиты

Интегрируемая переменная	Выходные сигналы/интегрируемая переменная	Интегрируемая переменная	Выходные сигналы/интегрируемая переменная
Y0	$y0$	Y26	$y24$
Y1	$y1$	Y27	$y15$
Y2	$y31 \cdot \dots \cdot y39$	Y28	$y34$

Интегрированная переменная	Выходные сигналы/интегрированная переменная	Интегрированная переменная	Выходные сигналы/интегрированная переменная
<i>Y3</i>	$y_{22} \cdot \dots \cdot y_{30}$	<i>Y29</i>	y_7
<i>Y4</i>	y_{40}	<i>Y30</i>	y_{25}
<i>Y5</i>	y_{41}	<i>Y31</i>	y_{16}
<i>Y6</i>	y_2	<i>Y32</i>	y_{35}
<i>Y7</i>	$y_{32} \cdot y_{34} \cdot y_{35} \cdot y_{36} \cdot y_{37}$	<i>Y33</i>	y_8
<i>Y8</i>	$y_{23} \cdot y_{25} \cdot y_{26} \cdot y_{27} \cdot y_{29}$	<i>Y34</i>	y_{26}
<i>Y9</i>	$y_{13} \cdot y_{15} \cdot y_{19} \cdot y_{21}$	<i>Y35</i>	y_{17}
<i>Y10</i>	$y_{22} \cdot y_{24} \cdot y_{28} \cdot y_{30}$	<i>Y36</i>	y_{36}
<i>Y11</i>	y_3	<i>Y37</i>	y_9
<i>Y12</i>	$y_{31} \cdot y_{33} \cdot y_{37} \cdot y_{39}$	<i>Y38</i>	y_{27}
<i>Y13</i>	$y_{22} \cdot y_{24} \cdot y_{28} \cdot y_{30}$	<i>Y39</i>	y_{18}
<i>Y14</i>	$y_{14} \cdot y_{16} \cdot y_{17} \cdot y_{18} \cdot y_{20}$	<i>Y40</i>	y_{37}
<i>Y15</i>	$y_{23} \cdot y_{25} \cdot y_{26} \cdot y_{27} \cdot y_{29}$	<i>Y41</i>	y_{10}
<i>Y16</i>	y_{31}	<i>Y42</i>	y_{28}
<i>Y17</i>	y_4	<i>Y43</i>	y_{19}
<i>Y18</i>	y_{22}	<i>Y44</i>	y_{38}
<i>Y19</i>	y_{13}	<i>Y45</i>	y_{11}
<i>Y20</i>	y_{32}	<i>Y46</i>	y_{29}
<i>Y21</i>	y_5	<i>Y47</i>	y_{20}
<i>Y22</i>	y_{23}	<i>Y48</i>	y_{39}
<i>Y23</i>	y_{14}	<i>Y49</i>	y_{12}
<i>Y24</i>	y_{33}	<i>Y50</i>	y_{30}
<i>Y25</i>	y_6	<i>Y51</i>	y_{21}

На рисунке Г.2 представлен орграф синтезированного автомата Мура, задающего логику работы противоаварийной защиты системы электропитания токамака КТМ. Орграф отображает полное пространство состояний синтезированного автомата Мура для всех возможных детектируемых типов аварий системы электропитания обмоток электромагнитной системы токамака

КТМ, с обозначением соответствующих интегрированных входных X и выходных Y переменных (соответствующих им векторов) [75].

Начальному состоянию автомата соответствует устойчивое состояние S_0 в котором данный автомат находится в случае отсутствия каких-либо аварийных ситуаций. При любом изменении значения входной интегрированной переменной X , характеризующей тип и локализацию аварии автомат переходит в следующее состояние, однозначно определяющее значение компонент выходного вектора управляющих противоаварийных воздействий – интегрированной переменной Y . Автомат под действием входного сигнала последовательно проходит цепочку необходимых состояний, в различных аварийных ситуациях совершает требуемое количество циклов через состояния S_0 и S_4 , затем, по факту полного завершения противоаварийного алгоритма (в том числе алгоритма приведения оборудования системы электропитания в безопасное состояние) и квитирования соответствующих аварийных сообщений переходит в терминальное состояние S_5 . Все необходимые действия выполняются в порядке очередного следования автоматически, без вмешательства операторов комплекса КТМ, что позволяет реализовать алгоритм противоаварийной защиты максимально эффективно, быстро и исключить из процесса фактор возможной человеческой ошибки [75].

Синтезированный автомат Мура является *частично определенным* - то есть, его характеристические функции определены для конкретных пар значений из множеств X и S , реализующих те или иные противоаварийные воздействия в зависимости от типа и локализации аварии (значения входного сигнала X) и текущего состояния автомата, *устойчивым* – поскольку автомат переходит в последующее состояние только под воздействием определенного входного сигнала из множества X , отличного от предыдущего входного сигнала (за исключением безусловных переходов, требуемых для логического завершения цепочки противоаварийных действий), *детерминированным* - поскольку автомат переходит только в одно определенное последующее состояние при воздействии соответствующего входного сигнала X и в зависимости от текущего состояния S [75, 79].

4.4 Разработка и исследование имитационной модели системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ с использованием математического аппарата сети Петри

Конечно-автоматная модель является вполне удобным средством описания реактивных дискретно-событийных систем, однако её главным недостатком является отсутствие параметров с бесконечной областью определения, в данном случае - отсутствие возможности учета и оценки времени выполнения формализуемого алгоритма. Наряду с этим, в конечно-автоматной модели невозможно учитывать требуемую иерархию состояний, использовать прерывания и выполнять их обработку [76].

Поскольку одной из основных задач реактивной дискретно-событийной противоаварийной системы электроэнергетического комплекса КТМ является минимизация времени реализации противоаварийных действий – становится очевидной необходимость распараллеливания происходящих в СПЗ процессов. В этой связи, необходимо на основе логики синтезированного автомата Мура реализовать модель, адекватно описывающую параллельно происходящие в СПЗ процессы, а также позволяющую оценить времена реализации противоаварийных действий для всех детектируемых типов аварий [75].

Одним из основных подходов при изучении поведения реактивных дискретно-событийных систем в динамике является разработка и верификация их модели с использованием математического аппарата сетей Петри [75, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91]. Формально сеть Петри представляет собой пятерку $N = (P, T, F, W, M_0)$, где (P, T, F) – элементы кортежа определяющие конечную сеть, а $W: F \rightarrow \mathbb{N} \setminus \{0\}$ и $M_0: P \rightarrow \mathbb{N}$ – функции кратности дуг и начальной разметки [87].

Графически (см. рисунок 4.2) сеть Петри представляет собой ориентированный двудольный мультиграф $G = (V, A)$, где V – множество вершин, а A – комплект направленных дуг, при этом множество вершин содержит два непересекающихся подмножества – позиции P и переходы T ($P \cap T = \emptyset$).

Ориентированные дуги соединяют вершины мультиграфа, при этом дуги, направленные от позиций к переходам, определяют позицию, являющуюся входом перехода, а дуги, исходящие из перехода – его выходом [88].

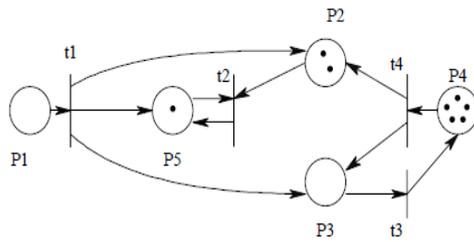


Рисунок 4.2 – Пример графа сети Петри [84]

В графическом представлении сети разметка вершин отображается размещением в них элементарных единиц сети Петри, называемых фишками (токенами). Сеть выполняется посредством запуска (срабатывания) переходов, при этом фишки из входных позиций удаляются, а в выходные позиции помещаются [87]. Количество удаляемых и помещаемых фишек соответствует количеству исходящих и входящих дуг. Переход может быть запущен только в том случае, если он разрешен. Такое событие достигается в случае, если каждая из входных позиций данного перехода обладает числом фишек не меньшим, чем число дуг, соединяющих соответствующие входные позиции с переходом [88].

Становится очевидной принципиальная возможность моделирования реактивных дискретно-событийных систем и протекающих в них параллельных процессов при помощи «классических» сетей Петри, но в случае систем с большим пространством состояний, обладающих емкими информационными потоками (большим набором переменных), в случае необходимости строгой конкретизации иерархии и условий срабатывания переходов сети (введения сложных условий ветвления алгоритмов), необходимости моделирования прерываний и их обработки, необходимости разделения типов сигналов (типов фишек), а также необходимости оценки времени прохождения сигналов (времени выполнения сети, времени реализации параллельно протекающих процессов при различных темпоральных зависимостях) – формализма «классических» сетей Петри становится недостаточно, либо модель, реализуемая посредством «классических»

сетей Петри становится очень сложной для построения, изучения и анализа [85, 87, 88].

За годы существования «классического» аппарата сетей Петри теория данных сетей существенно расширилась. В настоящее время одним из расширений теории сетей Петри, позволяющим качественно моделировать процессы, происходящие в реальных реактивных дискретно-событийных системах и учитывать темпоральные зависимости различного рода, является расширение в виде формализма раскрашенных временных сети Петри [75]. Данное расширение представляет собой гибкую алгоритмическую систему и по выразительности становится аналогичным машине Тьюринга [85, 87, 89, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97].

Согласно [91, 92, 98] временная раскрашенная сеть Петри это кортеж $TCPN = (\Sigma, P, T, F, C, W, G, M_0, Time)$, где: Σ – конечное множество цветов (атрибуты фишек); P – конечное множество позиций ($|P| \in N$); T – конечное множество переходов ($|T| \in N, P \cap T = \emptyset$); F – отношение инцидентности ($|F| \in N, F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$); $C: P \rightarrow \Sigma$ – функция, ставящая в соответствие каждой позиции $p \in P$ свой цвет (атрибут) $C(p) \in \Sigma$; W – функция, ставящая в соответствие тип выражения дуг, описанных при помощи некоторого языка типизированных выражений L с типом позиции, с которой связана эта дуга; G – защитная функция, сопоставляющая каждому переходу $t \in T$ выражение булевского типа (true, false); M_0 – функция, задающая начальную маркировку сети; $Time$ – функция временных интервалов $Time: T \rightarrow Interv(N)$, где $Interv(N) = \{[t_1, t_2], [t_3, \infty) | t_1, t_2, t_3 \in N, t_1 < t_2\}$.

Большое внимание развитию теории временных раскрашенных сетей Петри уделено коллективом исследователей под руководством профессора Курта Йенсена (Kurt Jensen) [99, 100, 101]. При его непосредственном участии в университете Орхуса (Aarhus University) разработана мощная программная среда CPN Tools, позволяющая моделировать и изучать иерархические временные раскрашенные сети Петри [94, 96].

В настоящее время программное обеспечение CPN Tools с успехом применяется при моделировании дискретно-событийных процессов во многих

областях, таких как: моделирование бизнес процессов, алгоритмов синхронизации и мониторинга, технологических процессов и производств и т.п. [83, 86, 90, 91, 102], однако наибольшее применение CPN Tools получило в моделировании телекоммуникационных систем, протоколов связи и передачи данных [93, 95, 96, 99, 100, 101]. Применение программного пакета CPN Tools позволяет в довольно сжатые сроки создавать и верифицировать очень сложные модели, анализ которых классическими численными методами не представляется возможным или очень затруднителен.

С учетом вышеизложенного, автором поставлена задача создания модели реактивной дискретно-событийной системы противоаварийной защиты электроэнергетического комплекса КТМ при помощи программного комплекса CPN Tools, с целью верификации логики работы системы, изучения её динамических свойств, проведения статистического анализа времён реализации противоаварийных действий и принятия решения о достаточности запаса системы по быстродействию. Пример применения аппарата временных раскрашенных сетей Петри с использованием программной среды CPN Tools при моделировании подобных систем автору неизвестен [75].

В целях оптимизации модели, уменьшения пространства состояний и разгрузки её графического представления - моделирование реализовано для 2-х (источники питания обмоток TF и CS) из 9-ти источников питания электромагнитной системы токамака КТМ, питающихся от двух независимых секций шин 10 кВ. Это позволило верифицировать логику работы всей противоаварийной системы для всех возможных детектируемых типов аварий электроэнергетического комплекса КТМ, а также провести статистический анализ времён реализации противоаварийных воздействий без потери качественных и количественных данных. Полное пространство состояний системы противоаварийной защиты, отображенное ранее в виде синтезированного автомата Мура, может быть получено в модели CPN Tools простым масштабированием соответствующих вершин орграфа модели, векторов аварий и векторов

противоаварийных воздействий для оставшихся 7-ми источников импульсного электропитания электромагнитной системы КТМ [75].

На рисунке Г.3 представлен оргграф синтезированной модели системы противоаварийной защиты электроэнергетического комплекса КТМ в среде CPN Tools [75]. На данном рисунке структурно выделяются следующие позиции и переходы:

BUFF IN (FAIL) – «входной» буфер, содержащий фишки красного цвета, характеризующие тип и локализацию аварии, представляющие собой мультимножества TFAIL типа BOOLEAN с меткой времени (вектор аварии в начальной разметке сети).

BUFF OUT (ACTION) – «выходной» буфер, содержащий фишки синего цвета, характеризующие тип и локализацию противоаварийного воздействия, представляющие собой мультимножества TACTION типа BOOLEAN с меткой времени (вектор противоаварийных воздействий).

MSG FAIL – буфер аварийных сообщений без метки времени (промежуточный), содержащий фишки типа STRING.

MSG FAIL TIME - буфер аварийных сообщений с меткой времени (терминальный), содержащий фишки типа STRING.

MSG ACTION - буфер сообщений о противоаварийных воздействиях без метки времени (промежуточный), содержащий фишки типа STRING.

MSG ACTION TIME - буфер сообщений о противоаварийных воздействиях с меткой времени (терминальный), содержащий фишки типа STRING.

END – терминальный буфер, принимающий фишки красного цвета по завершению реализации противоаварийного алгоритма.

P1 – P6 – промежуточные позиции сети, необходимые для её построения (учитывая специфику сетей Петри) и продвижения по ней фишек красного цвета.

B-220-T-1 FAIL – авария ПС КТМ 220 кВ - отключение выключателя 220 кВ B-220-T-1.

ALL CROWBAR ON / ST BY – включение / работа в режиме ожидания для всех кроубаров системы импульсного электропитания.

ALL SDC OFF – отключение всех контроллеров системы цифрового управления источниками импульсного электропитания со снятием управляющих импульсов.

BB1 (2) FAIL – авария на секции шин 10 кВ - отключение вводного выключателя BB1 или BB2.

TF (CS) EXT FAIL – внешняя авария по отношению к источнику импульсного электропитания обмотки TF или CS - инвертирование запасенной энергии в обмотке электромагнитной системы КТМ в сеть штатным способом.

TF (CS) OVERVOLT/SDC/B3 (B12) FAIL – перенапряжение на обмотке, выход из строя системы цифрового управления источником импульсного электропитания, авария на линейном выключателе 10 кВ (системе питания 10 кВ или согласующего трансформатора T1 или T2) для источника импульсного электропитания обмотки TF или CS - отключение линейного выключателя B3 или B12.

TF (CS) / TF(CS)PS FAIL – авария на обмотке, авария на оборудовании источника импульсного электропитания обмотки - аварийное инвертирование запасенной энергии в обмотке электромагнитной системы КТМ в сеть.

TF (CS) CROWBAR ON / ST BY - включение / работа в режиме ожидания кроубара источника импульсного электропитания обмотки TF или CS.

TF (CS) SDC OFF – штатное отключение контроллера системы цифрового управления источником импульсного электропитания обмотки TF или CS со снятием управляющих импульсов.

TF (CS) SDC OFF2 – аварийное отключение контроллера системы цифрового управления источником импульсного электропитания обмотки TF или CS со снятием управляющих импульсов.

SEND MSGF(A) – выдача аварийного сообщения / сообщения о противоаварийном воздействии без метки времени в промежуточный буфер.

SEND MSGF(A) TIME – выдача аварийного сообщения / сообщения о противоаварийном воздействии с меткой времени в терминальный буфер.

Начальная разметка сети реализуется размещением во «входном» буфере BUFF IN (FAIL) фишки красного цвета типа TFAIL, содержащей в себе вектор, характеризующий тип и локализацию конкретной аварии (сигналы с датчиков и первичных преобразователей, от цифровых защитных устройств и технологических контроллеров и т.п.). После размещения фишки в буфер BUFF IN (FAIL) она продвигается по сети по дугам красного цвета посредством срабатывания конкретных разрешенных переходов в зависимости от значения переменных вектора аварии (мультимножества TFAIL). Во время срабатывания переходов генерируются фишки типа TACTION, содержащие в себе вектор конкретного противоаварийного воздействия. Значение переменных фишек типа TACTION отвечает за тип и локализацию противоаварийного воздействия (сигналы на конкретные исполнительные механизмы и активное оборудование энергокомплекса). Фишки типа TACTION перемещаются по дугам синего цвета в «выходной» буфер системы противоаварийной защиты - BUFF OUT (ACTION) [75].

Терминальными буферами (позициями) сети для красных фишек является буфер - END, для синих - BUFF OUT (ACTION). Из данных буферов посредством срабатывания переходов SEND MSGF(A) фишки типа TFAIL и TACTION преобразуются в фишки типа STRING, содержащие сообщение о типе и месте локализации аварии, типе и месте локализации противоаварийного воздействия. Далее посредством срабатывания переходов SEND MSGF(A) TIME к фишкам типа STRING, преобразованным из фишек типа TFAIL и TACTION добавляется временная метка для обеспечения возможности идентификации времени задержки прохождения аварийного сигнала и времени задержки прохождения сигналов противоаварийных воздействий [75].

Для наиболее качественного статистического анализа принято, что одна единица модельного времени (MTU) соответствует 1 микросекунде реального времени поведения системы. Временные задержки на дугах и переходах сети реализованы с учетом паспортных данных о времени срабатывания и отклика исполнительных механизмов (коммутационных аппаратов), активного

электротехнического оборудования, устройств микропроцессорной защиты, технологических контроллеров и прочего задействованного оборудования, при этом, задержки моделируются с использованием математического аппарата теории вероятностей. В частности, при генерации случайных величин используется нормальное распределение вероятностей, которое задается следующей функцией

плотности вероятности: $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$, где: μ – математического ожидание, σ –

среднеквадратическое отклонение или при возведении в квадрат (σ^2) – дисперсия распределения, а также равномерное распределение вероятностей с функцией

плотности вероятности на отрезке $[a, b]$, при $a, b \in R: f(x) = \frac{1}{b-a}$, если $x \in [a, b]$ и

$f(x) = 0$, если $x \notin [a, b]$ [75].

В таблице 4.5 приведены основные данные о способах и параметрах моделирования временных задержек для активного оборудования энергокомплекса и оборудования системы противоаварийной защиты.

Таблица 4.5 – Способы и параметры моделирования временных задержек

Наименование оборудования	Распределение вероятностей	Значение переменных (MTU)
Сириус - Т, УВ, 2В, 2-Л, ШЗТ (детектирование аварии с выдачей сигнала на выключатель)	Нормальное	$\mu = 65\ 000$ $\sigma^2 = 5\ 000$
Сириус - Т, УВ, 2В, 2-Л, ШЗТ (реакция на сигнал телеуправления, выдача сигнала телеуправления)	Нормальное	$\mu = 35\ 000$ $\sigma^2 = 5\ 000$
Контроллеры СЦУ – модуль управления преобразователем (реакция на команду смены угла управления, снятие импульсов управления)	Равномерное	$a = 0$ $b = 1\ 666$
Унифицированные тиристорные преобразователи (минимальное возможное время переключения проводящих пар тиристоров)	Равномерное	$a = 0$ $b = 3\ 333$
Контроллеры СЦУ (watchdog таймер контроллера СЦУ)	Без генерации случайной величины	20 000 (период питающей сети)
Вакуумные выключатели нагрузки	Нормальное	$\mu = 50\ 000$ $\sigma^2 = 5\ 000$
Кроубары системы импульсного электропитания	Нормальное	$\mu = 200$ $\sigma^2 = 50$

При классическом анализе сетей Петри изучаются их основные свойства – безопасность, ограниченность, живость и достижимость [86, 87, 88, 94, 96, 103]. Программный пакет CPN Tools позволяет проводить анализ раскрашенных сетей Петри двумя способами – имитационным моделированием сети и автоматическим построением графа пространства состояний (приближенно графу достижимости в «классических» сетях Петри) [93, 96, 97].

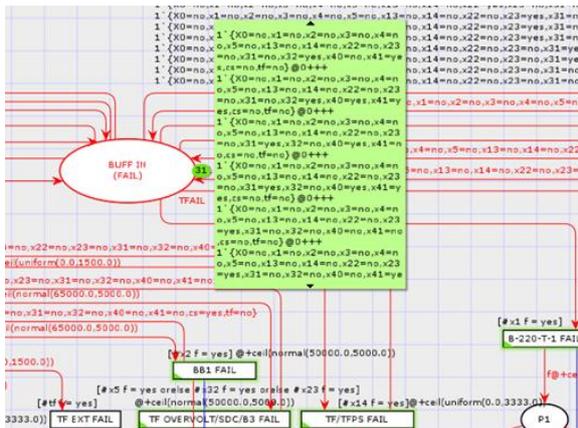
Пространство состояний раскрашенной сети Петри сложнее, чем граф достижимости классической сети Петри. В классической сети маркировка позиций представляет собой вектор натуральных чисел, а в раскрашенной сети – вектор мультимножеств (временных мультимножеств). Анализ пространства состояний возможен для достаточно небольших или простых моделей, что связано с эффектом их бурного роста [96].

Учитывая специфику моделируемой сети – большое количество вариантов начальной маркировки, равное количеству исследуемых типов аварий и невозможность в этой связи построить полный и единый граф пространства состояний модели, учитывая основную цель моделирования – изучение логики работы модели системы противоаварийной защиты электроэнергетического комплекса КТМ и статистических данных модели, касающихся времен реализации конкретных противоаварийных действий и алгоритмов [86, 93, 94, 96] – сеть анализировалась методом имитационного моделирования.

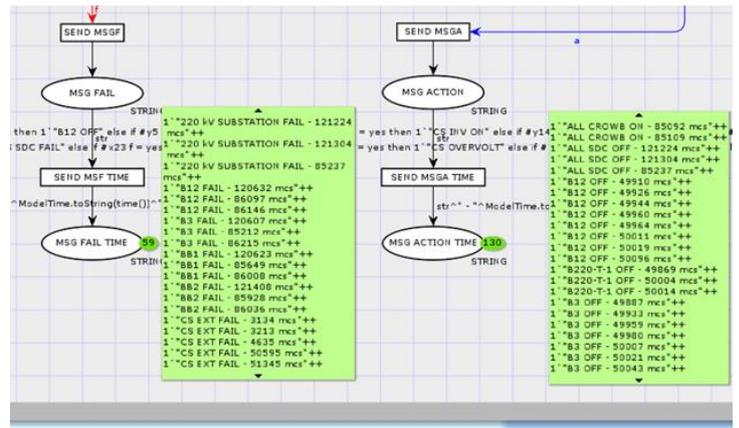
На первом этапе анализа модели стандартными средствами CPN Tools проверен синтаксис модели (используется язык описания CPN ML), после чего реализована пошаговая имитация работы модели для всех вариантов начальной разметки, как по отдельности (по одной фишке характеризующий тип и локализацию конкретной аварии), так и при одновременной загрузке в начальную разметку всех фишек (векторов аварий). Всего проанализировано 33 типа аварий, для двух источников импульсного электропитания, охватывающих полный перечень возможных и детектируемых аварий для всего энергокомплекса токамака КТМ, из которых по отношению к источникам питания 31 авария – внутренняя (вектор аварии помещается в начальную разметку), 2 аварии (по числу

моделируемых источников питания) – внешние (вектор аварии генерируется в процессе моделирования).

На рисунке 4.3а показана среда CPN Tools с загруженными 31-й фишками типа TFAIL в начальной разметке, а на рисунке 4.3б отображена модель по завершению всего цикла моделирования (реализации всех противоаварийных действий в системе).



а) с загруженной начальной разметкой



б) по завершению полного цикла реализации противоаварийных действий

Рисунок 4.3 – Модель системы противоаварийной защиты электроэнергетического комплекса КТМ в среде CPN Tools

Полный цикл противоаварийных действий для всех возможных типов аварий реализован за 523 программных шага и 121 419 единиц модельного времени. В процессе моделирования все 59 фишек красного цвета типа TFAIL (31-на загруженная изначально и 28-м сгенерированы в процессе моделирования как внешние по отношению к конкретному источнику питания аварии) конвертированы в фишки типа STRING и размещены в терминальном буфере аварийных сообщений с меткой времени - MSG FAIL TIME. В процессе моделирования сгенерировано 130 фишек синего цвета типа TACTION (вектора противоаварийных воздействий), которые конвертированы в фишки типа STRING и размещены в терминальном буфере сообщений о противоаварийных воздействиях с меткой времени – MSG ACTION TIME [75].

Имитационное моделирование позволило верифицировать логику работы и охарактеризовать синтезированную модель на основе временной раскрашенной сети Петри как - *ограниченную*, поскольку для конкретного числа фишек, размещенных в начальной разметки получено конкретное число фишек в терминальных буферах сообщений MSG FAIL TIME и MSG ACTION TIME (в модели не происходит неконтролируемой, циклической генерации фишек и число достижимых маркировок конечно), *живую*, поскольку при анализе всех возможных вариантов начальной разметки сети наблюдалось срабатывание полного количества используемых в модели переходов, *достижимую*, так как для всех вариантов начальной разметки сети существуют последовательности срабатывания переходов, приводящие к завершению логической цепочки противоаварийных воздействий (тупиковые ветки отсутствуют), *необратимую*, поскольку по завершению реализации всех противоаварийных алгоритмов автоматический возврат в исходное состояние сети невозможен (согласно логике работы моделируемой системы противоаварийной защиты входной буфер аварий BUFF IN (FAIL) по завершению реализации противоаварийных алгоритмов и приведение оборудования в безопасное состояние должен быть пуст) [75].

Логика выдачи сигналов противоаварийных воздействий в модели (в т.ч. селективность применяемых видов защит) соблюдается для всех типов промоделированных аварий и реализуется в соответствии с синтезированным ранее автоматом Мура [75]. В таблицах Г.1 и Г.2 отображены использованные при имитационном моделировании значения векторов аварий (фишки типа TFAIL) и векторов противоаварийных воздействий, генерируемых сетью (фишки типа TACTION).

Для анализа статистических данных модели, касающихся времен реализации конкретных противоаварийных алгоритмов в начальную разметку сети загружались по 9 векторов аварий с одинаковым значением внутренних переменных (фишек типа TFAIL) для полного количества векторов (типов аварий), представленных в таблице Г.1. В соответствии с количеством загруженных фишек типа TFAIL в начальной разметке сети проводилось по 9 опытов имитационного

моделирования до полной реализации всех противоаварийных воздействий и накопления требуемого количества статистических данных в терминальных буферах модели - MSG FAIL TIME и MSG ACTION TIME. Количество одинаковых фишек типа TFAIL (количество проводимых опытов для каждого из типа аварий – по 9 шт.) в начальной разметке выбрано исходя из общего количества источников импульсного электропитания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ. Всего для накопления статистических данных реализовано 297 опытов имитационного моделирования [75].

На основании данных из 9-ти проведенных опытов имитационного моделирования для каждого типа аварии выделены максимальное, минимальное и среднее значения времени реализации противоаварийного алгоритма. Среднее значение времени реализации противоаварийного алгоритма рассчитывалось по формуле: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, где n – количество опытов, равное 9, x_i – соответствующее время реализации противоаварийного алгоритма для конкретного опыта [75].

Результаты анализа статистических данных модели приведены в таблице 4.6. Аварии, в которых при моделировании выявлены равнозначные значения генерируемых времен задержек (обусловлено особенностью алгоритма генерации случайных величин для конкретной ЭВМ, а также одинаковым набором противоаварийных действий) объединены в соответствующие группы.

Анализ показал, что максимальное усредненное для 9-ти опытов время реализации противоаварийного алгоритма, равное 141,1 мс. наблюдается у аварии № 27, связанной с выходом из строя контроллера системы цифрового управления источника импульсного электропитания обмотки ТФ после старта разряда. Минимальное усредненное для 9-ти опытов время реализации противоаварийного алгоритма, равное 2,1 мс. наблюдается у аварии № 33 - внешней по отношению к источнику импульсного электропитания обмотки CS аварии [75].

Таблица 4.6 – Результаты анализа статистических данных модели

№ Типа аварии	Среднее время реализации цикла, полученное при моделировании, мкс.
1	85 518
2, 3	120 688
4, 5	85 831
6	121 152
7, 9	85 507
8	120 518
10, 12	85 568
11	120 669
13, 14	85 645
15	120 588
16, 17, 18	2 919
19, 20, 21	2 887
22, 24	105 716
23	140 688
25, 26	105 749
27	141 088
28, 29	120 669
30, 31	120 588
32	2 904
33	2 116

Основным требованием, предъявляемым к быстродействию систем противоаварийной защиты (систем релейной защиты и автоматики), является обеспечение возможности локализации аварии и реализации противоаварийных действий за времена, меньшие чем времена термической стойкости поврежденных электрических цепей и их элементов при протекании в них сквозных токов короткого замыкания [104, 105, 106, 107].

Для напряжений порядка 110-220 кВ при возникновении короткого замыкания в целях сохранения физической целостности оборудования, проводящих элементов и обеспечения устойчивости энергосистем рекомендована локализация и отключение поврежденного участка цепи за временной интервал в пределах 150 – 300 мс. В сетях напряжением 6 – 35 кВ допускаются времена отключения поврежденных участков за время 1,5-3 с [107].

Таким образом, в случае возникновения аварии № 27 с самым

длительным усредненным циклом реализации противоаварийного алгоритма, равным 141,1 мс. - запаса быстродействия моделируемой системы противоаварийной защиты электроэнергетического комплекса КТМ достаточно для локализации и ликвидации аварии с временем меньшим, чем нижняя граница

(150 мс) для самого требовательного сегмента сети системы электроснабжения комплекса КТМ с напряжением 220 кВ [75].

4.5 Верификация модели и внедрение алгоритмов противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ

По завершению монтажа и наладки системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ были проведены замеры времени прохождения сигналов и реализации противоаварийных действий. Замеры проведены для всех возможных и идентифицируемых групп аварий для случаев с максимальным усреднённым временем реализации противоаварийных действий (циклов) согласно данным, полученным при имитационном моделировании. Так, в группах аварий выделены аварии № 2, 3, 6, 8, 11, 15, 16, 17, 18, 23, 27, 28 и 29. Сопоставление модельных и экспериментально полученных данных приведено в таблице 4.7 [75].

Таблица 4.7 – Время реализации противоаварийных алгоритмов, полученных при моделировании и экспериментально [75]

№ аварии	Время реализации цикла модельное, мкс (среднее для 9-ти опытов)	Время реализации цикла экспериментальное, мкс (среднее для 9-ти ИП)	Относительная ошибка, %	Описание противоаварийных действий
2	120 688	119 397	1,08	Противоаварийный цикл: отключение выключателя В-220-Т-1, включение всех кроубаров, останов всех контроллеров СЦУ
3	120 688	119 397	1,08	
6	121 152	119 397	1,47	Противоаварийный цикл: отключение вводного выключателя ВВ1-10-Т-1, включение кроубара источника питания ТФ, останов контроллера СЦУ источника питания ТФ Параллельно: инвертирование для источника питания СS, останов контроллера СЦУ источника питания СS

№ аварии	Время реализации цикла модельное, мкс (среднее для 9-ти опытов)	Время реализации цикла экспериментальное, мкс (среднее для 9-ти ИП)	Относительная ошибка, %	Описание противоаварийных действий
8	120 518	119 397	0,94	<p>Противоаварийный цикл: отключение вводного выключателя ВВ2-10-Т-1, включение кроубара источника питания CS, останов контроллера СЦУ источника питания CS</p> <p>Параллельно: инвертирование для источника питания TF, останов контроллера СЦУ источника питания TF</p>
11	120 669	122 450	1,45	<p>Противоаварийный цикл: отключение линейного выключателя В12, включение кроубара источника питания CS, останов контроллера СЦУ источника питания CS</p> <p>Параллельно: инвертирование для источника питания TF, останов контроллера СЦУ источника питания TF</p>
15	120 588	122 450	1,52	<p>Противоаварийный цикл: отключение линейного выключателя В3, включение кроубара источника питания TF, останов контроллера СЦУ источника питания TF</p> <p>Параллельно: инвертирование для источника питания CS, останов контроллера СЦУ источника питания CS</p>
16	2919	3650	20,02	<p>Противоаварийный цикл: инвертирование и останов СЦУ для всех источников питания</p>
17	2919	3650	20,02	
18	2 919	3650	20,02	
23	140 688	139 038	1,19	<p>Противоаварийный цикл: отключение линейного выключателя В12, включение кроубара источника питания CS, останов контроллера СЦУ источника питания CS</p> <p>Параллельно: инвертирование для источника питания TF, останов контроллера СЦУ источника питания TF</p>
27	141 088	139 038	1,47	<p>Противоаварийный цикл: отключение линейного выключателя В3, включение кроубара источника питания TF, останов контроллера СЦУ источника питания TF</p> <p>Параллельно: инвертирование для источника питания CS, останов контроллера СЦУ источника питания CS</p>

№ аварии	Время реализации цикла модельное, мкс (среднее для 9-ти опытов)	Время реализации цикла эксперимента льное, мкс (среднее для 9-ти ИП)	Относительная ошибка, %	Описание противоаварийных действий
28	120 669	114 235	5,63	Противоаварийный цикл: включение кроубара источника питания CS, отключение линейного выключателя В12, останов контроллера СЦУ источника питания CS
29	120 669	114 235	5,63	Противоаварийный цикл: включение кроубара источника питания CS, отключение линейного выключателя В12, останов контроллера СЦУ источника питания CS Параллельно: инвертирование для источника питания TF, останов контроллера СЦУ источника питания TF

При проведении экспериментов на первичных преобразователях (датчиках) системы противоаварийной защиты с использованием генератора сигналов имитировались недопустимые уровни измеряемых сигналов, соответствующие условиям возникновения аварии конкретного типа и требующие реализации конкретных противоаварийных действий. Далее с помощью осциллографа регистрировалось время прохождения сигналов по системе противоаварийной защиты и время реакции исполнительных механизмов и их микропроцессорных устройств управления (силовых преобразователей, коммутационных аппаратов и т.п.) [75].

Расчёт относительной ошибки, полученной при имитационном моделировании проводился по формуле $\delta T_i = \left| \frac{x_i - x_i'}{x_i} \right| \times 100\%$, где x_i — полное время реализации противоаварийного алгоритма, полученное экспериментально, x_i' — полное время реализации противоаварийного алгоритма, полученное при имитационном моделировании.

На рисунке 4.4 показана диаграмма, отражающая соответствие модельных и экспериментально полученных данных.

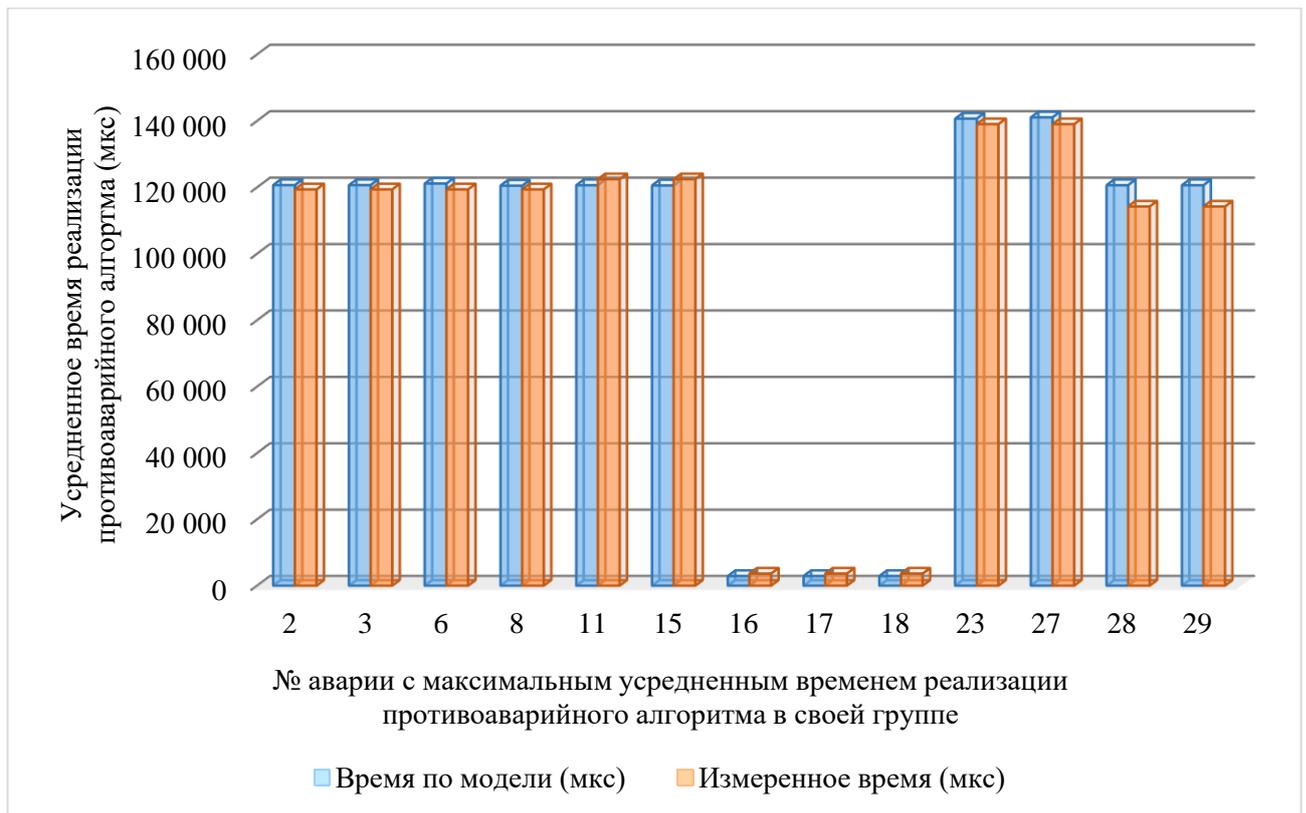


Рисунок 4.4 – Соответствие модельных и экспериментально полученных данных [75]

Максимальное значение $\delta T_{i \text{ макс}}$ составило 20,02% для аварий № 16, 17 и 18, что объясняется отсутствием учёта в модели транспортных задержек коммуникационных модулей и технологической сети, объединяющей контроллеры СЦУ по причине их незначительного влияния на время реализации противоаварийных алгоритмов в целом. Среднее значение δT_i при этом составило 6 %, что говорит о довольно хорошей корреляции модельных и экспериментально полученных данных [75].

4.6 Выводы по главе

В рамках данной главы обоснована необходимость создания системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ, как распределенной реактивной дискретно-событийной системы. Описан состав системы противоаварийной защиты и обозначены её границы. В ходе проведенного исследования определены все возможные и детектируемые для электротехнического комплекса токамака КТМ типы аварий. В целях эффективной реализации противоаварийных действий и действий по приведению электротехнического оборудования комплекса КТМ в безопасное состояние разработаны, формализованы, верифицированы с помощью имитационного моделирования и внедрены соответствующие противоаварийные алгоритмы [75].

В процессе разработки и внедрения алгоритмов противоаварийного управления электротехнического комплекса КТМ решены следующие задачи:

1. Определена оптимальная последовательность противоаварийных действий для всех детектируемых типов аварий и аномальных режимов работы электротехнического оборудования;

2. Алгоритмы противоаварийного управления формализованы в виде соответствующего автомата Мура. Внутренние и внешние переменные автомата Мура привязаны к входным и выходным сигналам системы противоаварийной защиты в соответствии с имеющимся в её составе контрольным и исполнительным оборудованием;

3. На основе логики синтезированного автомата Мура в программной среде CPN Tools при помощи математического аппарата временных раскрашенных сетей Петри осуществлено имитационное моделирование системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ. Временные задержки прохождения сигналов в системе моделировались при помощи математического аппарата теории вероятностей;

4. Проанализировано 33 типа аварий, охватывающих полный перечень возможных и детектируемых типов аварий для электротехнического комплекса

токамака КТМ. Для накопления статистических данных реализовано 297 опытов имитационного моделирования;

5. В ходе имитационного моделирования установлено, что логика выдачи сигналов противоаварийных воздействий (в т.ч. селективность применяемых видов защит) соблюдается для всех определенных типов аварий и реализуется в соответствии с синтезированным автоматом Мура [75].

Проведенные исследования позволили внедрить предложенные алгоритмы противоаварийной защиты и приведения оборудования электротехнического комплекса токамака КТМ в безопасное состояние в систему противоаварийной защиты комплекса КТМ. По результатам наладки системы противоаварийной защиты получены экспериментальные данные, хорошо коррелирующие с данными статистического анализа, проведенного при имитационном моделировании, что позволяет судить об адекватности и применимости используемого подхода при решении схожих задач в других областях науки и отраслях промышленности. Временные задержки реализации противоаварийных действий в системе противоаварийной защиты не превышают нижний порог лимита по локализации аварий в самом требуемом сегменте сетей электротехнического комплекса КТМ — сегменте сети с напряжением 220 кВ [75].

Заключение

Основной целью диссертационной работы являлось создание необходимых условий, достижение требуемых параметров, обеспечение устойчивости и повышение качества плазменных разрядов на установке КТМ. Обеспечение условий безопасной эксплуатации оборудования электротехнического комплекса за счет применения специализированных схемотехнических решений, разработки эффективных алгоритмов управления и защиты, применения методов компьютерного аналитического и имитационного моделирования на этапе разработки, верификации, внедрения и эксплуатации СИЭП, её СЦУ и СПЗ. Расширение базы знаний в области технического, математического и информационного обеспечения СЦУ и СПЗ сверхмощных источников электропитания [5].

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие научно-технические задачи, получены результаты и сделаны выводы:

1. Обоснована актуальность темы исследования. Проанализирован объект управления и необходимые исходные данные, накладывающие требования к СИЭП КТМ как к исполнительному механизму системы управления плазмой. Изучен передовой мировой опыт, определены возможности по развитию и улучшению отдельных решений. Обоснована необходимость создания компьютерной аналитической модели СИЭП КТМ и её СЦУ, доказана перспективность её использования;

2. Сформулированы основные требования к СИЭП обмоток ЭМС токамака КТМ, как к исполнительному механизму системы управления плазмой. Определена структура энергокомплекса КТМ. Разработано и оптимизированно для целей управления и диагностики нестандартное электрооборудование установленной мощностью 513 МВт (71 % от общего количества оборудования СИЭП). По всем СПП ТП СИЭП КТМ достигнут коэффициент неравномерности распределения тока на уровне 6 %, т.е. в 2,5 раза лучше, чем полученный в СИЭП аналогичных установок [1, 12, 20, 21] и требуемый по стандартам. Предложены и

математически описаны алгоритмы диагностики ТП СИЭП КТМ. Разработан и внедрен ключ-прерыватель постоянного тока ИП обмотки CS с собственной подсистемой управления, отличающийся от схожих решений [7, 9, 27, 28, 31] применением СПП без использования электромеханических схем. Достигнуто устойчивое прерывание тока за время порядка 3 мс (в СИЭП ITER и JT-60SA - 5,75 и 8,5 мс соответственно);

3. Приведено детальное описание моделируемой СЦУ СИЭП КТМ. Доработан, верифицирован и внедрен алгоритм импульсно-фазового управления ТП ИП КТМ. Проведено исследование статических и динамических характеристик ИП КТМ. Реализована СУ и осуществлен синтез цифрового регулятора напряжения ИП КТМ. Рассчитаны внешние характеристики ИП КТМ и определены границы режимов их работы. Разработан, верифицирован и внедрен алгоритм управления ИП обмотки CS, позволяющий реализовать требуемый сценарий эволюции тока в обмотке и осуществлять его реверс без паузы в области нулевого значения, при этом эффективно использовать потребляемую из сети мощность. Реализована и верифицирована в ходе успешно проведенного физического пуска установки КТМ комплексная Simulink/Simscape модель СИЭП КТМ совместно с её СЦУ. Приведенная интегральная оценка точности воспроизведения сценария изменения напряжения и тока в обмотках ЭМС в ходе моделирования и реального эксперимента не превысила 5 %, что регламентирует осуществимость и стабильность поддержания плазменного разряда в установке КТМ.

4. Обоснована необходимость создания СПЗ энергокомплекса КТМ, как распределенной реактивной дискретно-событийной системы. Приведен состав СПЗ и обозначены её границы. Изучены все возможные и детектируемые для КТМ типы аварий и определена оптимальная последовательность противоаварийных действий. Алгоритмы противоаварийного управления изложены и формализованы в виде автомата Мура. На основе логики автомата Мура в среде CPN Tools при помощи математического аппарата временных раскрашенных сетей Петри разработана и внедрена имитационная модель СПЗ КТМ. По результатам наладки СПЗ получены экспериментальные данные, хорошо коррелирующие с модельными

данными (среднее значение относительной ошибки при моделировании составило 6 %), что доказывает адекватность и применимость предложенного подхода при решении схожих задач в других областях науки и отраслях промышленности. Полученные временные задержки реализации противоаварийных действий в СПЗ не превышают нижний порог лимита по локализации аварий в самом требуемом сегменте сетей электротехнического комплекса КТМ — сегменте сети с напряжением 220 кВ.

Таким образом, прошедшие необходимую апробацию результаты данной диссертационной работы, позволяют судить о том, что поставленные в ней научно-технические задачи решены полностью, а основная цель работы была достигнута. Полученные результаты позволят расширить схмотехническую базу систем импульсного электропитания сверхмощных электрофизических установок, базу математического и информационного обеспечения систем управления такими электротехническими комплексами, а также комплекс решений, используемых при аналитическом и имитационном моделировании технологических процессов, их систем управления и противоаварийной защиты.

Список сокращений и условных обозначений

АЦП	аналого-цифровой преобразователь
БОФ	блок расчета опорной фазы
БСПС	блок синхронизации с питающей сетью
БФИ	блок формирования импульсов управления
БФС	блок расчета фазовых сдвигов
ВЛЭП	высоковольтная линия электропередач
ВН	высокое напряжение
ВО	вентильная обмотка
ВОЛС	волоконно-оптическая линия связи
ВЧ-нагрев	высокочастотный нагрев
ДНТ	датчик нулевого тока
ДСК	драйвер силового ключа
ЗУ	задающее устройство (СУП)
ИИС	информационно-измерительная система
ИП	источник питания
КЗ	короткое замыкание
КТМ	казахстанский токамак материаловедческий
ЛМС	локальный модуль синхронизации
ЛПУ	логическое переключающее устройство
МВЦС	модуль ввода цифровых сигналов
МУП	модуль управления преобразователем
НН	низкое напряжение
ОР	оптический разветвитель
ОРУ	открытое распределительное устройство
ОЭП	оптико-электрический преобразователь
ПБВ	переключатель без возбуждения

ПИТ-3к	преобразователь измерительный телеметрический (3-х канальный)
ППН	первичный преобразователь напряжения
ПС	энергетическая подстанция
РПН	регулятор напряжения под нагрузкой
САУ	система автоматического управления
СИФУ	система импульсно-фазового управления
СИЭП	система импульсного электропитания
СН	среднее напряжение
СО	сетевая обмотка
СПЗ	система противоаварийной защиты
СПП	силовой полупроводниковый прибор
СУ	система управления
СУП	система управления плазмой
СЦУ	система цифрового управления
СШ	секция шин
ТК	ключ-прерыватель постоянного тока ИП CS КТМ
ТП	тиристорный преобразователь
ТЭО	технико-экономическое обоснование
УР	уравнительный реактор
УСЭ	устройство сброса энергии
УУК	устройство управления кроубаром
ХХ	холостой ход
ЦБС	центральный блок синхронизации
ЩДУ	шкаф дистанционного управления
ЩЗТ	шкаф защиты трансформатора
ШИМ	широтно-импульсная модуляция
ЭВМ	электронно-вычислительная машина
ЭМД	система электромагнитной диагностики

ЭМС	электромагнитная система
CCR	Circuit Controllers
CCS	Central Control System
CCU	Current Commutation Unit
CIS	Central Interlock System
Ск	батарея конденсаторов (ключ-прерыватель ИП CS КТМ)
CODAC	COntrol, Data Access and Communication
CS	обмотка центрального соленоида (КТМ)
CSS	Control System Studio
DMA	Data Management & Analysis
EPICS	Experimental Physics and Industrial Control System
EPMS	Explosively-actuated Protective Make Switch
FDS	Fast Disconnect Switch
FOS	Fast Open Switch
HFC	обмотка быстрого управления (КТМ)
LCC	Local Control Cubicles
LIC	Local Interlock Controller
Lk	коммутирующий дроссель (ключ-прерыватель ИП CS КТМ)
LSC	Local Safety Controllers
MCS	Master Control System
MDC	Machine & Discharge Control
MPS	Magnet Power Supplies
MRC	Master Controllers
MS	Make Switch
MTU	единица модельного времени
PCS	Plasma Control System
PF	обмотка полоидального поля (КТМ)
PIN	Plant Interlock Network

PIS	Plant Interlock System
PSS	Plant Safety System
Rbal	балластное сопротивление (ключ-прерыватель ИП CS КТМ)
SCS	Supervisory Control System
SDN	Synchronous Data bus Network
SNR	Switching Network Resistor
TCB	Thyristor Circuit Breakers
TCN	Time Communication Network
TF	обмотка тороидального поля (КТМ)
VDO	диодная сборка (ключ-прерыватель ИП CS КТМ)
VTK	коммутирующая сборка (ключ-прерыватель ИП CS КТМ)
VTO	главная тиристорная сборка (ключ-прерыватель ИП CS КТМ)

Список литературы

1. Электротехнический комплекс системы импульсного электропитания токамака КТМ / Д.Б. Зарва, А.А. Дериглазов, Э.Г. Батырбеков, И.Л. Тажибаева, В.М. Павлов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. – 2018. – Т. 41, № 2. – С. 59–70.
2. Инженерный (базовый) сценарий рабочего импульса установки КТМ. Расширенное описание. Аннотационный отчет НТЦ «Синтез» 19.11.2003. По договору №9-20036 от 11.03.03 г. -6 с.
3. ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ. "МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ СЦЕНАРИЯ ТОКА ПЛАЗМЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ИСТОЧНИКУ ПИТАНИЯ ОБМОТКИ УПРАВЛЕНИЯ НФС" по этапам 1 – 7 договора № 137 от 10 июня 2006 г. по теме: «Разработка и адаптация алгоритмов управления током, положением и формой плазменного шнура в токамаке КТМ». НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, НТЦ «СИНТЕЗ». 12 октября 2006 г. - 45 с.
4. Рабочий проект «Токамак КТМ. Система электромагнитная». 1А.517.368 ВС. НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург, 2008. – 249 с.
5. Имитационное моделирование системы импульсного электропитания токамака КТМ / Д.Б. Зарва, А.М. Ли, В.М. Павлов, Э.Г. Батырбеков и др. // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 105–111.
6. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей. Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
7. ITER coil power supply and distribution system / J. Tao, I. Benfatto, K. GoffJ., A. Mankani et al. // Proc. of the IEEEINPSS 24th Symposium on Fusion Engineering. – Chicago (IL, USA). – 2011. – P. 5–6.
8. EMS power supply system / N.A. Daniel, B.A. Larionov, N.A. Monoszon, A.G. Roshal et al. // Plasma Devices and Operations. – 1992. – Vol. 1. – P. 253–266.

9. Power supply system of EAST superconducting tokamak / P. Fu, Z.Z. Liu, G. Gao, L. Yang et al. // Proc. of the 5-th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – Taichung (Taiwan). – 2010. – P. 459.
10. The DTT device: Power supplies and electrical distribution system / A. Lampasi, P. Zito, F. Starace, P. Costa et al. // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 122. – P. 356–364.
11. ITER Electrical Distribution System / J. Hourtoule, C. Neumeyer, I. Suh, Y. Ding et al. // Proc of the IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE). – San Francisco, CA (USA). – 2013. – P. 6–11.
12. Bertolini E. The JET magnet power supplies and plasma control systems / E. Bertolini, P.L. Mondino, P. Noll // Fusion Technology. – 2017. – Vol. 11. – P. 84.
13. JT-60 power supplies / R. Shimada, M. Tsuneoka, T. Matsukawa, T. Aoyagi et al. // Fusion Engineering and Design. – 1987. – Vol. 5. – P. 47–68.
14. Overview of the new Magnet Power Supply Systems of JT-60SA procured by EU / L. Novello, O. Baulaigue, A. Coletti, N. Dumas et al. // Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol. 98–99. – P. 1122–1126.
15. ITER Power Supply Innovations and Advances / C. Neumeyer, I. Benfatto, J. Hourtoule, J. Tao et al. // Proc of the IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE). – San Francisco, CA (USA). – 2013. – P. 11–19.
16. Lampasi A. Survey of Electric Power Supplies Used in Nuclear Fusion Experiments / A. Lampasi, S. Minucci // Proc. of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. – Milan (Italy). – 2017. – P. 1–6.
17. Multimodular, high current, fast response IGBT inverter power supply of SST-1 tokamak / D.K. Sharma, A. Varadharajullu, R. Ramesh, V. Kumar // Proc. of the 17-th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe). – Geneva (Switzerland). – 2015. – P. 21–31.
18. Design and realization of JT-60SA Fast Plasma Position Control Coils power supplies / P. Zito, A. Lampasi, A. Coletti, L. Novello et al. // Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol. 98–99. – P. 1191–1196.

19. Jo H. ITER VS Converter Control for Circulation Current and Commutation Failure / H. Jo, H. Cha // Proc. of the IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – Charlotte, NC (USA). – 2015. – P. 3212–3216.
20. Final design of the Korean AC/DC converters for the ITER coil power supply system / J.-S. Oh, J. Choi, J.-H. Suh, J. Choi et al. // Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol. 98–99. – P. 1127–1130.
21. Korean R&D on the 6-pulse converter unit for ITER AC/DC converters / J.S. Oh, J. Choi, J.H. Suh, H. Liu et al. // Proc. of the IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering. – Chicago, IL (USA). – 2011. – P. 1–6.
22. Preliminary design of the ITER AC/DC converters supplied by the Korean Domestic Agency / J.S. Oh, J. Choi, J.H. Suh, H. Liu et al. // Fusion Engineering and Design. – 2013. – Vol. 88. – P. 1555–1559.
23. Fuentes R. Effects of layout on current distribution in paralleled thyristors of high current rectifiers / R. Fuentes, L. Neira // Proc. IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. – Calgary, Alta (Canada). – 2007. – P. 1–6.
24. Peng C. An improvement on current sharing characteristics of poloidal field (PF) AC—DC Converters / C. Peng, F. Peng, S. Zhiquan // Plasma Science and Technology. – 2011. – Vol. 13. – P. 1–6.
25. Энергетический комплекс для электропитания электрофизических установок / Э.А. Азизов, Р.П. Васильев, А.А. Гостев, И.Г. Стрижова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2016. – Т. 38. № 4. – С. 38–54.
26. Fusion Applications of Large DC-Current Interruption Units / F. Milani, I. Benfatto, A. Roshal, I. Song et al. // Fusion Science and Technology. – 2012. – Vol. 16. – P. 83–88.
27. Design and analysis of switching network units for the ITER coil power supply system / A. Roshal, S. Avanesov, E. Koktsinskaya, M. Manzuk et al. // Fusion Engineering and Design. – 2011. – Vol. 86. – P. 1450–1453.

28. Final design of the switching network units for the JT-60SA central solenoid / A. Lampasi, A. Coletti, L. Novello, M. Matsukawa et al. // Fusion Engineering and Design. – 2014. – Vol. 89. – P. 342–348.
29. The Fast Discharge System of ITER Superconducting Magnets / I. Song, A. Roshal, V. Tanchuk, J. Thomsen et al. // Proc. of the International Conference on Electrical Machines and Systems. – Beijing (China). – 2011. – P. 6–12.
30. The 70 kA pyrobreaker for ITER magnet back-up protection / M. Manzuk, S. Avanesov, A. Roshal, K. Bestuzhev et al. // Fusion Engineering and Design. – 2013. – Vol. 88. – P. 1537–1540.
31. Final design of the quench protection circuits for the JT-60SA superconducting magnets / E. Gaio, A. Maistrello, A. Coffetti, T. Gargano et al. // Transactions on Plasma Science. – 2012. – Vol. 40. – P. 557–563.
32. United States Patent 4,174,471. EXPLOSIVELY ACTUATED OPENING SWITCH / R. D. Ford, T. Hills; I. M. Witkovitsky, S. Spring. Nov. 13, 1979. – p. 6.
33. Control and instrumentation of the ITER coil power supply system / J.K. Goff, I. Benfatto, J. Tao, I. Yonekawa et al. // Proc. of the IET Conference on Control and Automation: Uniting Problems and Solutions. – Birmingham (UK). – 2013. – P. 10–16.
34. THE CODAC SOFTWARE DISTRIBUTION FOR THE ITER PLANT SYSTEMS / F.Di Maio, L. Abadie, C. Kim, K. Mahajan et al. // Proc. of the International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems – ICALEPCS. – Grenoble (France). – 2011. – P. 249–252.
35. KOREAN R&D ON THE CONVERTER CONTROLLER FOR ITER AC/DC CONVERTERS / J.H. Suh, J.S. Oh, J. Choi, E.H. Song et al. // Proc. of the IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering. – Chicago, IL (USA). – 2011. – P. 6–11.
36. Development and commissioning results of the KSTAR discharge control system / K. Kim, M. Park, S.-H. Hahn, M.K. Kim // Fusion Engineering and Design. – 2009. – Vol. 84. – P. 1049–1054.
37. A New Power Locus for the p-q Operation of Series Connected 12-Pulse Current Source Controlled Converters / M.S. Hamad, M.I. Masoud, A.M. Massoud, S.J.

Finney, et al. // Proc. of the IEEE Power Electronics Specialists Conference. – Rhodes (Greece). – 2008. – P. 2264–2270.

38. On the Sequential Control of ITER Poloidal Field Converters for Reactive Power Reduction / Y. Hongwen, F. Peng, G. Ge, H. Liansheng et al. // Plasma Science and Technology. – 2014. – Vol. 16. – P. 1147–1152.

39. Sequence Control of Small-scaled ITER Power Supply for Reactive Power Compensation / H.-S. Heo, K.-W. Park, I.-C. Jeong, H.-S. Shin et al. // Proc. of the IEEE International Conference on Industrial Technology. – Vina del Mar (Chile). – 2010. – P. 813–817.

40. Jo H. Sequence Control Verification of a Central Solenoid Converter for Nuclear Fusion Reactors by using a Hardware-in-the-Loop / H. Jo, H. Cha // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 64. – P. 6864–6873.

41. A Novel Control for Four-quadrant Operation of ITER VS Converter / C. Lee, H. Liu, K. Hwang, S. Lee et al. // Proc. of the International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Busan (South Korea). – 2013. – P. 1657–1661.

42. Operation of KSTAR PF Superconducting Magnet Power Supplies Under MG Power System / H.-S. Ahn, D.-K. Lee, J.-H. Choi, J.-K. Jin et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – Vol. 26. – P. 6–10.

43. Маркин В.В. Техническая диагностика вентиляльных преобразователей / В.В. Маркин, В.Н. Миронов, С.Г. Обухов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.

44. Lezana P. Fault Detection on Multicell Converter Based on Output Voltage Frequency Analysis / P. Lezana, R. Aguilera, J. Rodriguez // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56. – P. 2275–2283.

45. Пат. 88161 РФ, МПК МПК G01R 31/02 (2006.01). Устройство диагностики трехфазных выпрямителей [Текст] / С.Н. Чижма, И.Ю. Мацько; заявитель и патентообладатель Омский гос. унив. путей сообщ. – N 2009126479/22; заявл. 10.07.2009; опубл. 27.10.2009. – 2 с.

46. Пат. 2310877 РФ, МПК МПК G01R 31/02 (2006.01). Способ диагностики трёхфазного тиристорного выпрямителя [Текст] / В.Д. Кулик, А.Е. Козярук и др.; заявитель и патентообладатель С.-Пб. гос. горный инст. им. Г.В.

Плеханова (техн. унив.). – N 2006118772/28; заявл. 30.05.2006; опубл. 20.11.2007, – 2 с.

47. Рабочий проект. Система импульсного электроснабжения казахстанского материаловедческого токамака КТМ. КТМ.03.001-0-ЭИ. Том 12. ТОО «Промэнергопроект», г. Семей.

48. Технический проект силовой части полупроводникового преобразовательного комплекса источника питания обмотки НФС. Пояснительная записка. Семипалатинск 2007. Республика Казахстан. ТОО «Промэнергопроект».

49. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СТЕНДОВОГО КОМПЛЕКСА КАЗАХСТАНСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОГО ТОКАМАКА КТМ". Книга 3. СХЕМА ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КТМ. ЗАО "Институт "КазНИПИЭнергопром". г. Алматы, 2000 г. - 46 л. с приложениями.

50. Шогенов А.Х. Теория электрических цепей: учебное пособие для среднего профессионального образования / А.Х. Шогенов, Д.С. Стребков. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 248 с.

51. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Электроснабжение / под ред. А. А. Федоров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – Т. 1. – 568 с.

52. Лыкин А.В. Электроэнергетические системы и сети. Методические указания и упражнения для самостоятельной работы по направлению «Электроэнергетика и электротехника» / А.В. Лыкин, Ю.М. Сидоркин. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – 66 с.

53. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

54. Федоров А.А. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Том 1 Проектно-расчетные сведения / А.А. Федоров, Г.В. Сербиновский. – М.: «Энергия», 1973. – 568 с.

55. НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ПРОЕКТИРОВЩИКА КАБЕЛИ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА НАПРЯЖЕНИЕ 6-35 кВ. ООО

«Камский кабель» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.kamkabel.ru/netcat_files/userfiles/6-35-www.pdf, свободный (дата обращения: 18.06.2019).

56. Nasser Tleis. Power Systems Modelling and Fault Analysis. Theory and practice. / 2-е изд. – London: Elsevier, 2019. – 942 с.

57. Simscape electrical. Specialized Power Systems. User's guide. – Natick: The Mathworks, 2019. – 336 с.

58. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

59. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: Учеб. Пособие. – М.: Университетская книга; Логос, 2008. – 254 с.

60. Испытание мощных трансформаторов и реакторов 2-е изд. перераб. / Г.В. Алексенко, А.К. Ашрятов, Е.А. Веремей, Е.С. Фрид. – М.: Энергия, 1978. – 520 с.

61. Лизунова С.Д. Силовые трансформаторы. Справочная книга / С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

62. Я.Л. Фишлер. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Урманов Р. Н., Пестряева Л. М. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.

63. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов / Попов В. В. – С.-Пб.: Питер, 2008. – 320 с.

64. Shaarbafi K. Transformer Modelling Guide. – Calgary: Alberta Electric System Operator, 2014. – 304 с.

65. Писарев А.Л. Управление тиристорными преобразователями / Деткин Л.П. – М.: Энергия. – 1975. – 264 с.

66. Шипилло В. П. Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.

67. Донской Н. В. [и др.]. Управляемый выпрямитель в системах автоматического управления. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 352 с.

68. Беркович Е. И. Полупроводниковые выпрямители / В. Н. Ковалев, Ф. И. Ковалев [и др.], 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.
69. Каганов И. Л. Электронные и ионные преобразователи. Цепи питания и управления ионных приборов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. – Т.3. – 528 с.
70. UHV Transmission Technology / Под общей ред. The China Electric Power Research Institute. – London: Academic Press, 2018. – 743 с.
71. Донской Н. В. [и др.]. Динамика вентильного электропривода постоянного тока. – М.: Энергия, 1975. – 224 с.
72. Leonhard W. Control of Electrical Drives. / 3rd ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo : Springer. – 2001. – 473 с.
73. А. А. Булгаков. Новая теория управляемых выпрямителей. – М: Наука. – 1970. – 320 с.
74. Гурецких Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М: Машиностроение. – 1974. – 328 с.
75. Система противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ. Алгоритмическое и информационное обеспечение / Д.Б. Зарва, А.А. Дериглазов, Э.Г. Батырбеков, И.Л. Тажибаева, В.М. Павлов и др. // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42, № 1. – С. 74–88.
76. Карпов Ю.Г. Теория автоматов. – СПб.: Питер, 2003. – 208 с.
77. Верификация автоматных программ / С.Э. Вельдер, М.А. Лукин, А.А. Шалыто, Б.Р. Яминов. – СПб.: Наука, 2011. – 244 с.
78. Ramadge P.J. SUPERVISORY CONTROL OF A CLASS OF DISCRETE EVENT PROCESSES / P.J. Ramadge, W.M. Wonham // SIAM Journal on Control and Optimization. – 1987. – Vol. 25. – P. 206–230.
79. Гуренко В.В. Введение в теорию автоматов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 62 с.
80. Гилл А. Введение в теорию конечных. – М.: Наука, 1966. – 272 с.

81. Мелихов А.Н. Ориентированные графы и конечные автоматы. – М.: Наука, 1971. – 416 с.
82. Хопкрофт Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Д. Хопкрофт, Р. Мотвани, Д. Ульман. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2008. – 528 с.
83. Цветные сети Петри в моделировании социально-экономических систем / Ю.П. Ехлаков, В.Ф. Тарасенко, О.И. Жуковский, П.В. Сенченко и др. // Доклады ТУСУР. – 2013. – Т. 3. – С. 83–92.
84. Захаров Н.Г. Синтез цифровых автоматов / Н.Г. Захаров, В.Н. Рогов. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 136 с.
85. Мальков М.В.. СЕТИ ПЕТРИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ / М.В. Мальков, С.Н. Малыгина // Труды Кольского научного центра РАН. – 2010. – №3. – С. 35–40 с.
86. Моделирование системы поддержания единого времени на основе иерархической раскрашенной сети Петри [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/72TVN217.pdf>, свободный (дата обращения: 18.06.2019).
87. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
88. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
89. Дворянский Л.В. Имитационное моделирование и верификация вложенных сетей Петри с использованием CPN Tools / Л.В. Дворянский, И.А. Ломазова // Моделирование и анализ информационных систем. – 2012. – Т. 19. – С. 115–130.
90. Юдаев В.В. Применение сетей Петри для моделирования и верификации протоколов обеспечения транспортной безопасности / В.В. Юдаев, Б.В. Зубков // Авиационная и ракетно-космическая техника. – 2016. – Т. 4. – С. 156–161.
91. Бухтияров И.В. Сети Петри как инструмент спецификации специализированной сервис-ориентированной информационной среды для

производства программных продуктов // Доклады ТУСУР. – 2014. – Т. 4. – С. 100–108.

92. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой. – М.: Научный мир, 2004. – 208 с.

93. Анализ сетей Петри в среде моделирования CPN Tools [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2010_9_8, свободный (дата обращения: 18.06.2019).

94. Суконщиков А.А. Теория вычислительных процессов: методические указания к лабораторным работам. Моделирование раскрашенных сетей Петри в CPN Tools / А.А. Суконщиков, Д.В. Кочкин. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 60 с.

95. Воевода А.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ В CPN TOOLS / А.А. Воевода, Д.О. Романников // СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ НГТУ. – 2008. – Т. 3. – С. 49–54.

96. Зайцев Д.А. Учебное пособие по курсу «Математическое моделирование систем и сетей» / Д.А. Зайцев, Т.Р. Шмелева. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2009. – 72 с.

97. Венгжин А. Использование раскрашенных сетей Петри для моделирования и верификации параллельных устройств логического управления / А. Венгжин, А.Г. Короткевич // Радиоэлектроника и информатика. – 2000. – Т. 4. – С. 70–74.

98. Королев Ю.И. Методы и программные средства моделирования сложных динамических систем на основе темпоральной модификации раскрашенных сетей Петри: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2015. – 145 с.

99. Jensen K. An introduction to the practical use of coloured Petri Nets // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – Vol. 1492. – P. 237–292.

100. Jensen K. An introduction to the theoretical aspects of coloured Petri Nets // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – Vol. 803. – P. 230–272.

101. Jensen K. Coloured Petri Nets: A high level language for system design and analysis // High-level Petri Nets. – 1991. – P. 44–119.

102. Седых И.А. Применение раскрашенных временных сетей Петри для моделирования цементного производства / И.А. Седых, Е.С. Аникеев // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – Т. 4. – С.140–145.

103. Романников Д.О. ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА CPN TOOLS ДЛЯ АНАЛИЗА СЕТЕЙ ПЕТРИ / Д.О. Романников, А.В. Марков // СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ НГТУ. – 2012. – Т. 2. – С. 105–116.

104. Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 20 марта 2015 года № 230 «Об утверждении Правил устройства электроустановок» (с изменениями по состоянию на 25.12.2017).

105. Правила устройства электроустановок РФ. Приказ Минэнерго России от 08.07.2002 № 204. Раздел 3. Защита и автоматика.

106. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. РД 153-34.0-20.527-98. Российское акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России».

107. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

Приложение А. Анализ исходных данных и проблем создания системы импульсного электропитания токамака КТМ

Таблица А.1 – Электротехнические параметры обмоток электромагнитной системы токамака КТМ [1, 5]

Индуктивности обмоток ЭМС L, мГн									
Обмотка	TF	CS	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	HFC
TF	7,0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	0	11,840	0,68919	0,13058	0,73038	0,44413	0,25467	0,81186	0,11393
PF1	0	0,68919	2,9000	0,18860	0,59676	0,02101	0,03305	0,24466	0,66001
PF2	0	0,13058	0,18860	0,52000	0,60658	0,01588	0,02572	0,19801	0,93184
PF3	0	0,73038	0,59676	0,60658	11,800	0,16520	0,27313	2,20662	3,20967
PF4	0	0,44413	0,02101	0,01588	0,16520	3,5000	0,41525	0,44679	-0,80527
PF5	0	0,25467	0,03305	0,02572	0,27313	0,41525	1,2500	0,79499	-1,74019
PF6	0	0,81186	0,24466	0,19801	2,20662	0,44679	0,79499	11,800	-0,67431
HFC	0	0,11393	0,66001	0,93184	3,20967	-0,80527	-1,74019	-0,67431	17,01923
Сопротивления обмоток ЭМС									
Обмотка	TF	CS	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	HFC
R, мОм	6,8	31,15	10,5	5,4	29,0	8,0	8,4	29,0	202,6

Таблица А.2 – Сценарии изменения токов в полоидальных обмотках токамака КТМ
[2, 3]

Время, с	I_p , А	I_{cs} , А	I_{PF1} , А	I_{PF2} , А	I_{PF3} , А	I_{PF4} , А	I_{PF5} , А	I_{PF6} , А
0.001	105	30000.0	13686.4	-2339.9	1296.1	28249.0	-2928.9	586.6
0.016	3000	27412.8	12755.8	-2214.1	1188.7	27363.0	-2736.0	478.7
0.035	50000	23405.9	11831.2	-1446.8	419.1	28129.5	-1553.4	-360.7
0.045	75000	22074.1	11095.3	-1677.8	212.7	26257.8	-2125.6	-510.4
0.065	125000	19600.5	10174.1	-2439.4	-326.6	24942.8	-2717.8	-791.3
0.085	175000	17168.6	9126.2	-3220.8	-678.4	24196.2	-3246.7	-1263.2
0.105	225000	15000.1	8134.3	-3887.0	-950.9	23055.0	-3801.0	-1714.4
0.135	300000	11685.1	6936.9	-4792.2	-1481.4	21343.6	-4635.5	-2263.1
0.165	375000	8287.1	5424.6	-5932.0	-1678.5	20684.0	-5573.6	-3141.3
0.195	450000	5602.5	2998.2	-6400.3	-1230.1	23707.4	-8128.0	-4369.5
0.225	525000	2277.6	3796.4	-6454.4	-2718.8	27953.3	-12081.4	-4381.9
0.315	750000	-5173.0	1848.6	-1001.1	-5016.0	28999.5	-13768.9	-5995.3
0.400	750000	-6166.8	600.2	1700.2	-6392.6	23223.2	-10901.8	-6531.7
0.855	750000	-9092.6	-350.2	1265.3	-6725.3	19948.5	-9842.6	-6748.4
1.766	750000	-14249.0	-1899.2	400.8	-6924.7	15608.3	-9114.6	-6952.9
2.677	750000	-18490.1	-2899.8	-665.8	-7150.2	11907.4	-8216.2	-7095.6
3.588	750000	-22463.6	-4000.8	-1332.8	-7320.5	8258.8	-7366.0	-7276.7
4.500	750000	-25668.1	-5367.5	-2200.8	-7297.8	4575.5	-6194.9	-7471.6
4.700	700000	-24749.8	-3802.6	-13999.0	-4461.9	8008.5	-8515.5	-7046.4
4.750	630000	-26309.3	-6312.6	-13999.4	-3002.2	10351.4	-10425.3	-7058.3
4.850	380000	-27011.6	-11016.5	-6443.2	-2723.7	-24001.1	-305.9	-3176.7
4.890	250000	-28837.6	-11944.0	-2410.8	-2695.3	-28999.7	3017.9	-2527.1
4.950	30000	-25524.7	-8801.7	-5518.6	-982.4	-22745.6	1957.4	-827.5

Таблица А.3 – Сценарии изменения напряжений на полоидальных обмотках токамака КТМ [2, 3]

Время, с	U_{cs}, В	U_{PF1}, В	U_{PF2}, В	U_{PF3}, В	U_{PF4}, В	U_{PF5}, В	U_{PF6}, В
0.016	-2002.5	-267.2	-26.8	-191.5	-183.4	-34.1	-188.7
0.035	-2469.0	-273.7	-34.0	-532.4	27.0	23.4	-538.2
0.045	-1691.3	-300.0	-46.9	-353.6	-487.6	-159.8	-325.7
0.065	-1504.2	-221.4	-48.1	-394.3	-221.9	-105.6	-286.1
0.085	-1461.1	-232.8	-46.5	-321.0	-149.2	-92.8	-362.6
0.105	-1306.8	-215.6	-41.6	-277.8	-188.4	-95.3	-350.7
0.135	-1320.0	-189.8	-39.4	-299.3	-188.3	-93.3	-305.5
0.165	-1348.5	-217.0	-40.3	-211.4	-110.0	-92.8	-398.6
0.195	-1054.2	-275.4	-27.7	-14.3	169.6	-127.9	-486.4
0.225	-1234.6	-17.3	-30.4	-557.0	254.3	-168.7	-180.7
0.315	-949.0	-101.9	0.1	-290.7	-10.1	-51.4	-254.7
0.400	-186.4	-51.5	-0.8	-173.2	-159.4	14.4	-95.5
0.860	-80.9	-10.8	-2.1	-15.3	-19.3	-1.5	-13.2
1.770	-70.00	-9.0	-1.7	-9.1	-13.4	-2.2	-9.2
2.680	-57.4	-6.6	-1.5	-8.3	-11.2	-1.4	-7.4
3.590	-54.0	-6.6	-1.3	-7.2	-11.1	-1.4	-7.4
4.500	-44.0	-6.7	-1.1	-4.3	-10.7	-0.7	-6.3
4.700	60.5	18.9	-13.7	120.4	40.0	-7.0	32.4
4.750	-405.5	-156.2	-3.6	225.7	89.7	-43.0	-18.0
4.850	-298.4	-159.8	21.0	38.9	-978.8	52.1	374.9
4.890	-648.4	-92.7	21.8	-8.8	-299.3	60.2	102.6
4.950	638.4	161.0	0.8	270.6	258.0	25.6	280.5

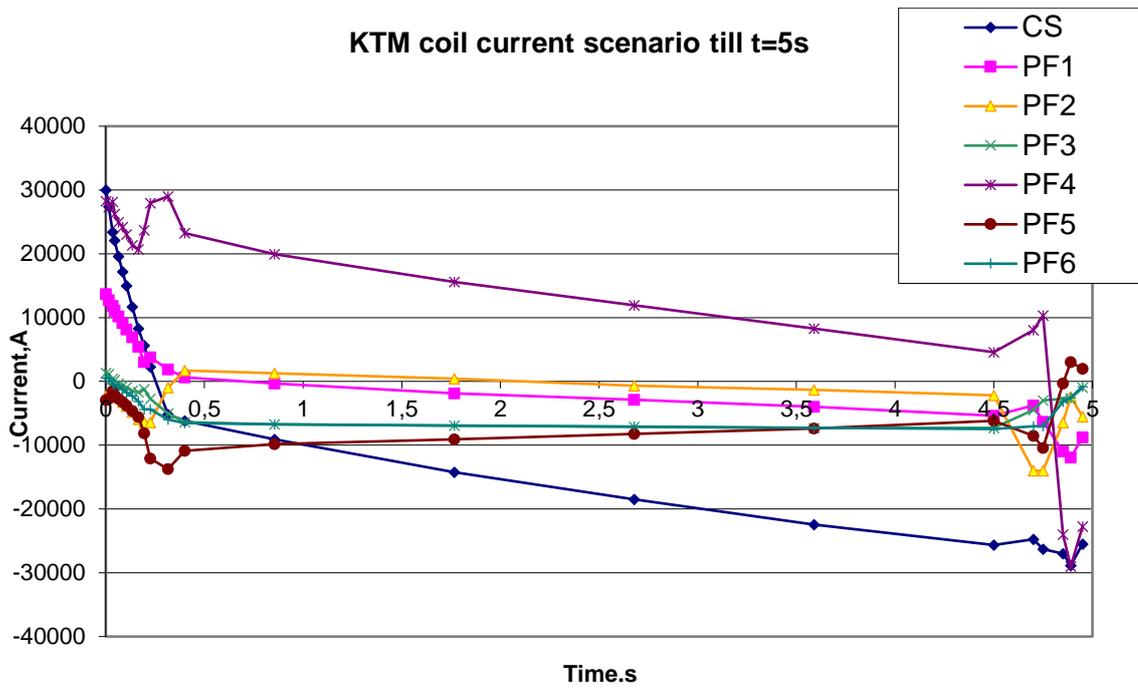


Рисунок А.1 – Графики изменения токов в обмотках полоидальных полей установки КТМ [2, 3]

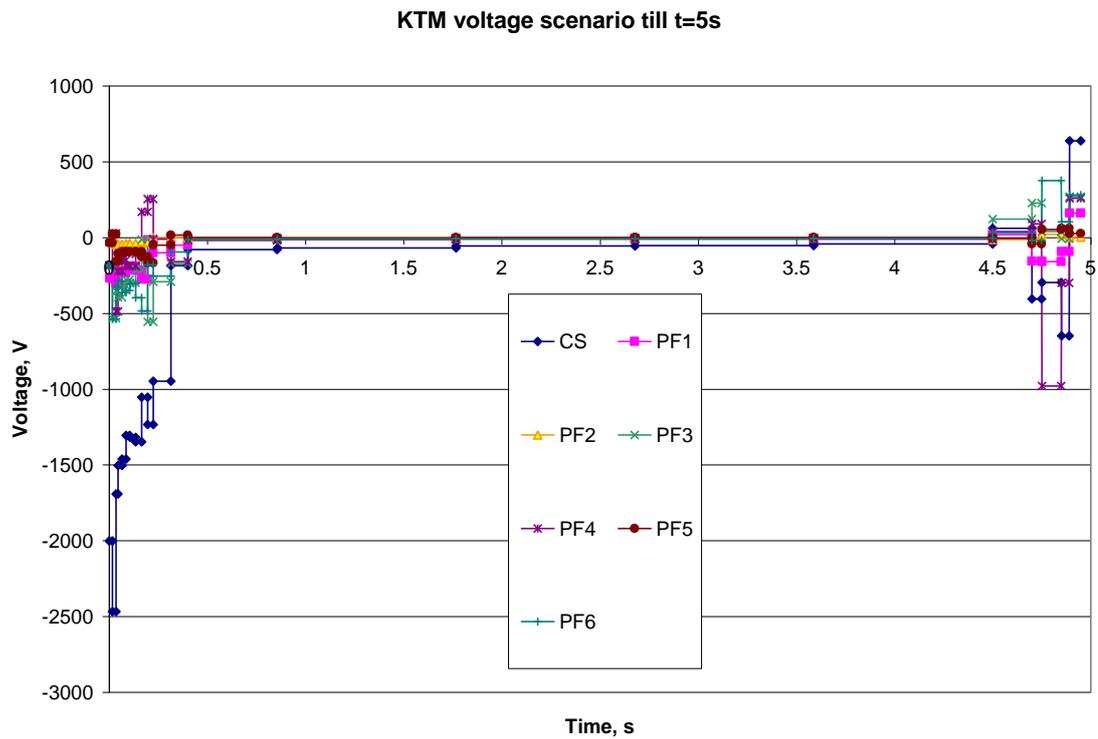


Рисунок А.2 – Графики изменения напряжений на обмотках полоидальных полей установки КТМ [2, 3]

Приложение Б. Разработка и оптимизация для целей управления и диагностики системы импульсного электропитания токамака КТМ. Подготовка исходных данных для аналитического компьютерного моделирования

Таблица Б.1 – Электротехнические характеристики ИП установки КТМ, их функции, режимы работы, используемое в их составе электротехническое оборудование [1, 5]

Источник питания (ИП)	Функции в составе СИЭП	Коэффициент пульсаций	Параметры ИП		Структура преобразовательного комплекса	Характеристики по управляемости и режимам работы	Тип и количество полупроводниковых приборов в преобразователях	Электротехническое оборудование
			I_{\max} , кА	U_{\max} , кВ				
ИП обмотки TF	Создание и стабилизация в ходе разряда тороидального магнитного поля.	$q = 1\%$ ($k = 12$)	60	1	Модульная. 4-ре ТП.	Полностью управляемый, только выпрямительный режим	Тиристор SCR 1200/18, 144шт.	- Трансформатор ТДЦНП-50000/10 НГУ1 – 1 шт. - Преобразователь ТП ($U_d=1$ кВ, $I_d=15$ кА) – 4 шт. - Реактор УРОС-2500 УХЛ4 – 2 шт. - Кроубар БТШ-1 – 1 шт.
ИП обмотки CS	Создание вихревого электромагнитного поля на стадии пробоя рабочего газа. Поддержание тока и омический нагрев плазмы в течении разряда.	$q = 1\%$ ($k = 12$)	± 30	± 3	Модульная. 8 ТП, ключ-прерыватель.	Полностью управляемый с реверсированием тока в совместном/раздельном режиме управления	Тиристор SCR 1200/18, 288 шт. в ТП. Тиристор SCR 1200/18, 102 шт., диод 1500/16, 60 шт. в ключ-прерывателе	- Трансформатор ТДЦНП-50000/10 НГУ1 – 1 шт. - Преобразователь ТП ($U_d=1$ кВ, $I_d=15$ кА) – 8 шт. - Реактор УРОС-2x15-1,75УХЛ3 – 2 шт. - Кроубар БТШ-3 – 1 шт. - Ключ-прерыватель 30 кА – 1 шт. - Балластное сопротивление (0,22; 0,13; 0,09; 0,05 Ом) – 1 комплект.

ИП обмотки PF1	Создание полюидальных магнитных полей, отвечающих за форму и положение плазмы.	$q = 1\%$ ($k = 12$)	± 15	$\pm 0,6$	Модульная. 4 ТП. Встречно-параллельная схема соединения. По 2 ТП в источнике.	Полностью управляемые с реверсированием тока в отдельном режиме управления	Тиристор SCR 1200/18, 72 шт.	- Трансформатор ТДНП-12500/10 У1 – 4 шт. - Преобразователь ТП ($U_d=1$ кВ, $I_d=15$ кА) – 8 шт. - Реактор УРОС-2x15-0,35УХЛ3 – 4 шт. - Кроубар БТШ-1 – 4 шт.				
ИП обмотки PF2							Тиристор SCR 1200/18, 72 шт.					
ИП обмотки PF3							Тиристор SCR 1200/18, 72 шт.					
ИП обмотки PF6							Тиристор SCR 1200/18, 72 шт.					
ИП обмотки PF4							± 30	$\pm 0,6$	Модульная. 4 ТП. Встречно-параллельная схема соединения. По 4 ТП в источнике.	Полностью управляемый, инвертор напряжения 1 кГц, с ШИМ-управлением	Тиристор SCR 1200/18, 144 шт.	- Трансформатор ТДНП-12500/10 У1 – 2 шт. - Преобразователь ТП ($U_d=1$ кВ, $I_d=15$ кА) – 8 шт. - Реактор УРОС-2x15-0,35УХЛ3 – 2 шт. - Кроубар БТШ-1 – 2 шт.
ИП обмотки PF5											Тиристор SCR 1200/18, 144 шт.	
ИП обмоток НФС	Стабилизация быстрых вертикальных смещений плазмы в ходе разряда.	$q = 1\%$ ($k = 12$) в звене постоянно го тока	± 3	± 1	Модульная. 2 ТП с последовательным соединением.	Полностью управляемый, инвертор напряжения 1 кГц, с ШИМ-управлением	Тиристор SCR 1200/18, 36 шт.	- Трансформатор ТДНП-12500/10 У1 – 1 шт. - Преобразователь ТП ($U_d=1$ кВ, $I_d=7.5$ кА) – 2 шт. - Кроубар БТШ-1 – 2 шт.				
					Моноблок (инвертор напряжения)		IGBT-транзистор 2400/17, 12 шт.		- Инвертор напряжения $U=1$ кВ, $I=3$ кА, $f=1$ кГц – 1 шт. -Устройство сброса энергии УСЭ – 1 шт.			

Таблица Б.2 – Исходные данные для расчета параметров трансформаторов электротехнического комплекса токамака КТМ

Трансформатор, тип	Схема соединения обмоток	Номинальные мощность (МВА) и напряжения (В)				Напряжение (%), потери (кВт) и коэффициенты КЗ				Ток (%) и потери (кВт) XX	
		S	U_1	U_2	U_3	% u_k	$k_{k,k}$	$k_{k,ч}$	P_k	% i_{xx}	P_{xx}
T ₀ -ТРДЦМ–100000/220У1	У _н /ДД-11-11	100	230000	10500	10500	13,2	–	1,9	333	0,086	61,2
T ₁ -ТДЦНП–50000/10НГУ1	Д _{авто} /ДДУУ-11,875-0,875	34,25	10500	797	788,5	10,9	1,05	1,83	238,6	0,188	31
T ₂ -ТДЦНП–50000/10НГУ1	Д _{авто} /ДДУУ-11,625-0,625	34,25	10500	797	788,5	9,58	1,05	1,83	236,26	0,189	34,8
T ₃ -ТДНП–12500/10У1	Д/ДУ-0-11	6,3	10000	368	372	10,1	1,05	–	71,01	0,122	5,45
T ₄ -ТДНП–12500/10У1	Д/ДУ-0-11	6,3	10000	368	372	10,3	1,05	–	70,37	0,112	5,15
T ₅ -ТДНП–12500/10У1	Д/ДУ-0-11	6,3	10000	368	372	10,05	1,05	–	67,76	0,131	5,4
T ₆ -ТДНП–12500/10У1	Д/ДУ-0-11	6,3	10000	368	372	10,1	1,05	–	68,73	0,166	5,85
T ₇ -ТДНП–12500/10У1	Д/ДУ-0-11	6,3	10000	368	372	9,92	1,05	–	67,95	0,13	5,7
T ₈ -ТДНП–12500/10У1	Д/ДУ-0-11	6,3	10000	368	372	10	1,05	–	69,26	0,127	5,28
T ₉ -ТДНП–12500/10У1	Д/ДУ-0-11	6,3	10000	368	372	10,01	1,05	–	69,3	0,168	6,75

Приложение В. Моделирование системы импульсного электропитания в среде Simulink/Simscapе. Определение режимов работы электротехнического оборудования. Разработка и верификация алгоритмов управления и диагностики

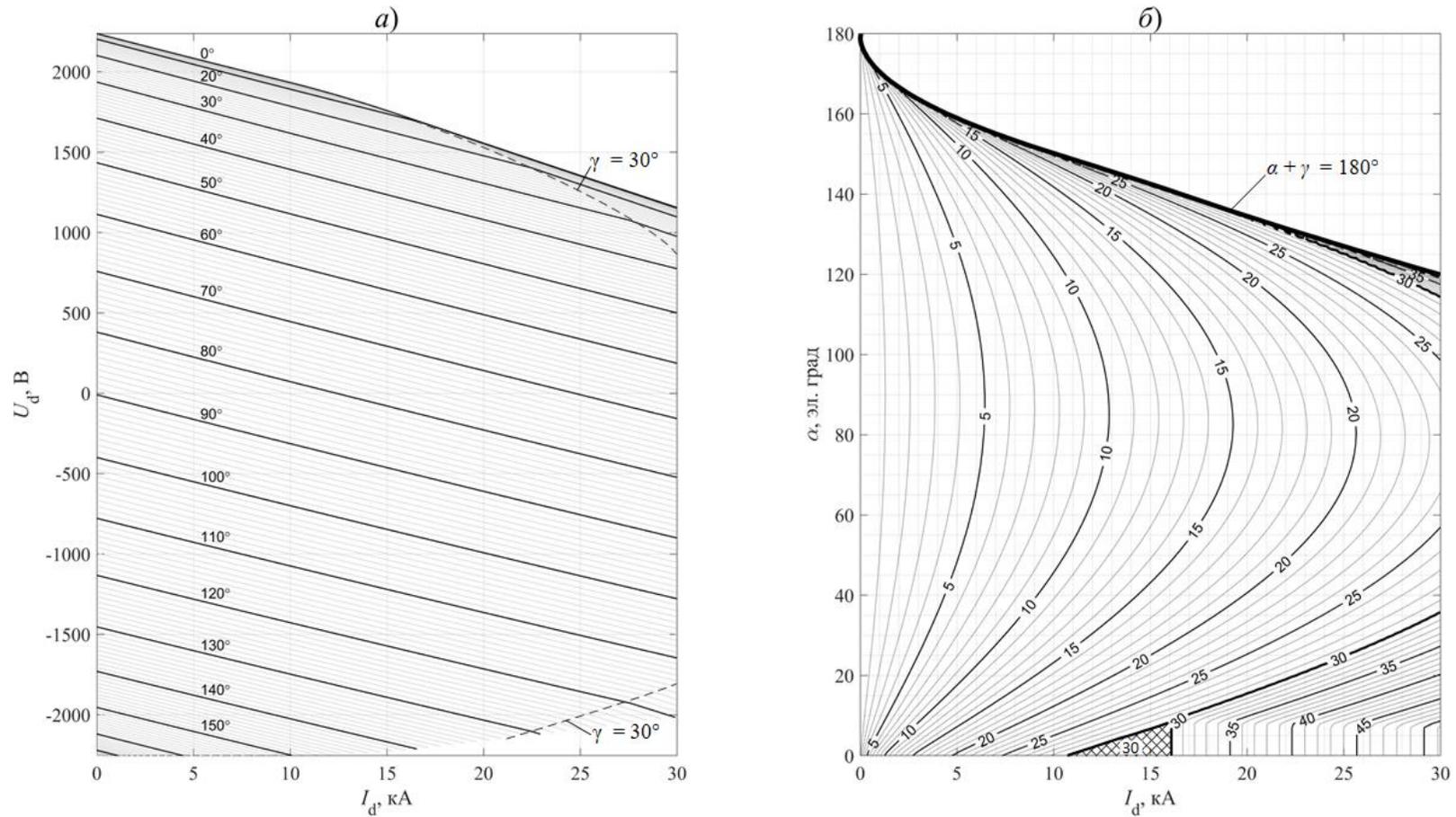


Рисунок В.1 – Внешние характеристики ИП CS: а) $U_{d,CS} = f(I_d)$ при различных значениях угла управления $\alpha = \text{Const}$; б) номограмма угла коммутации $\gamma_{CS} = f(I_d, \alpha)$ [5]

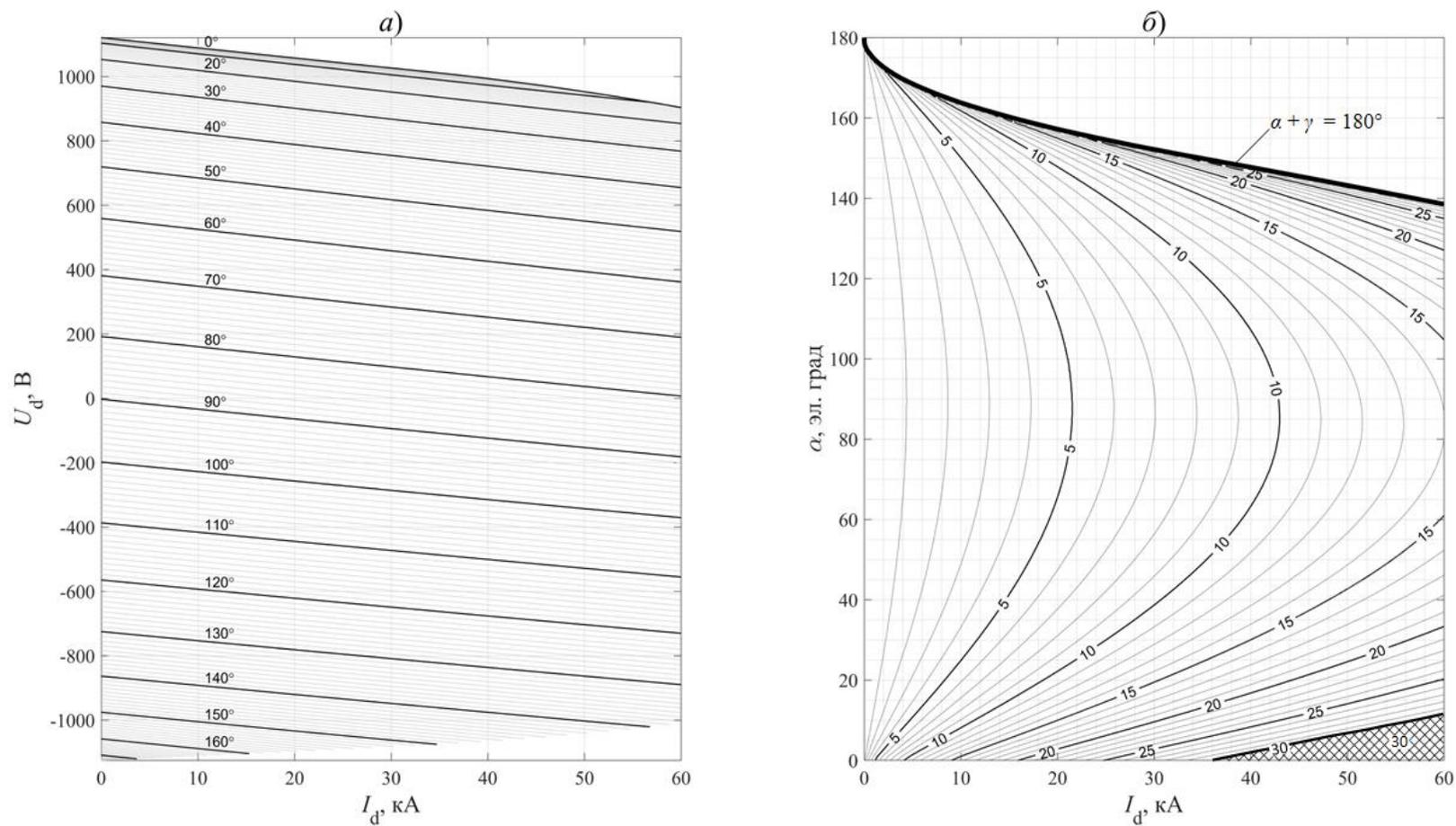


Рисунок В.2 – Внешние характеристики ИП ТФ: а) $U_{d,TF} = f(I_d)$ при различных значениях угла управления $\alpha = \text{Const}$; б) номограмма угла коммутации $\gamma_{TF} = f(I_d, \alpha)$ [5]

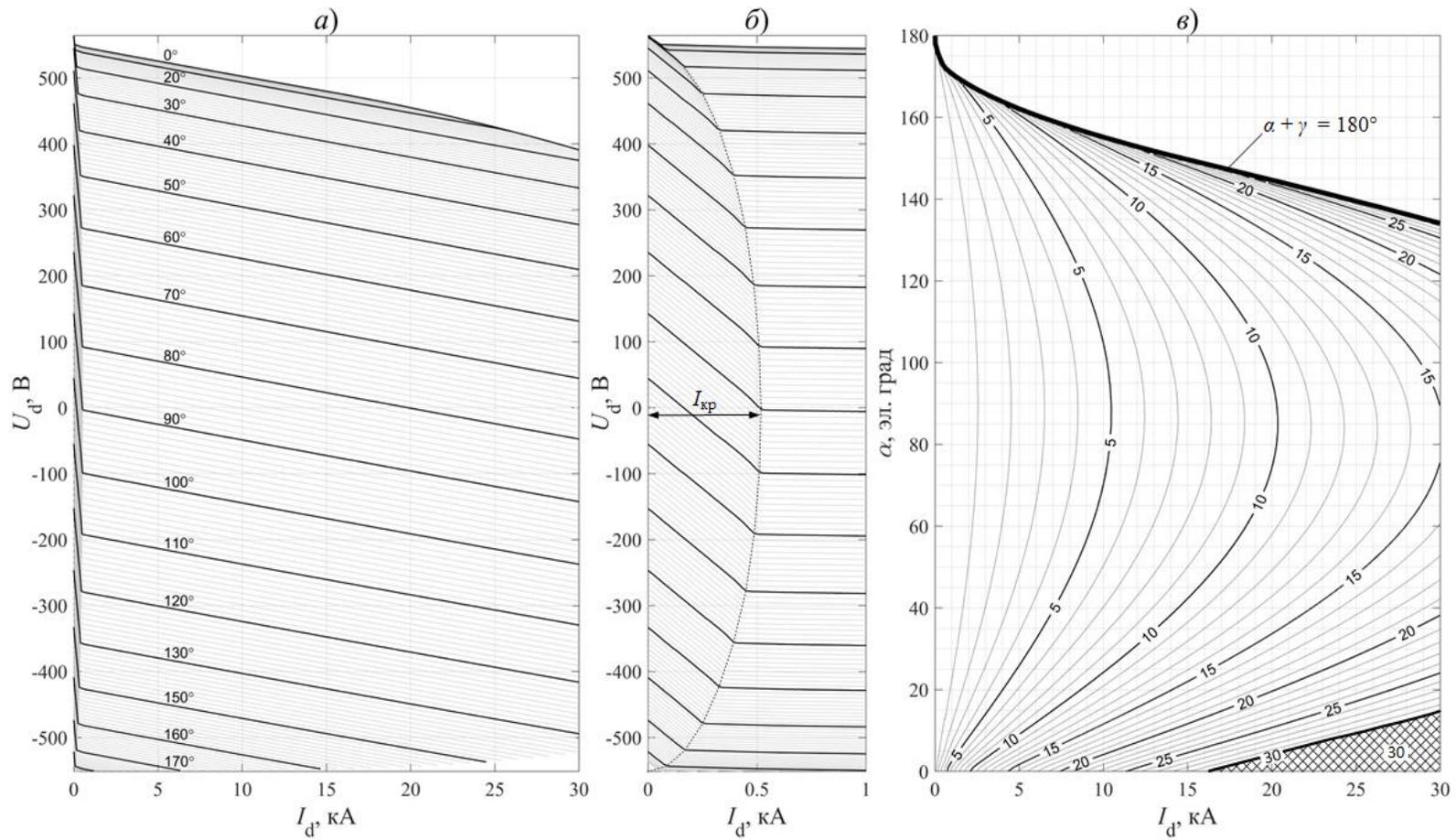


Рисунок В.3 – Внешние характеристики ИП PF4: а) $U_{d,PF4} = f(I_d)$ при различных значениях угла управления $\alpha = \text{Const}$; б) увеличенный фрагмент с докритическим режимом работы; в) номограмма угла коммутации $\gamma_{PF4} = f(I_d, \alpha)$ [5]

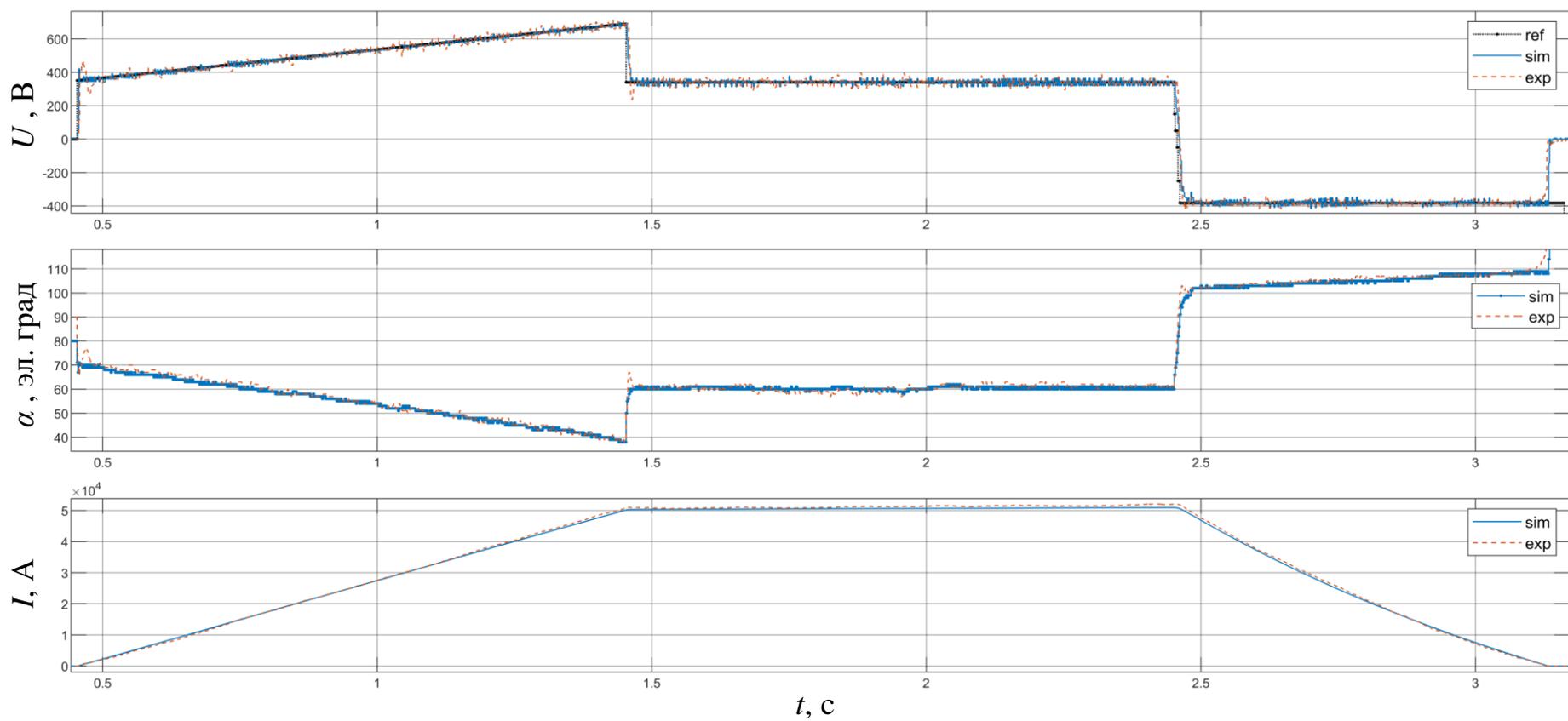


Рисунок В.4 – Сравнение результатов моделирования ИП TF (sim) с экспериментальными данными разряда № 3575 (exp) [5]

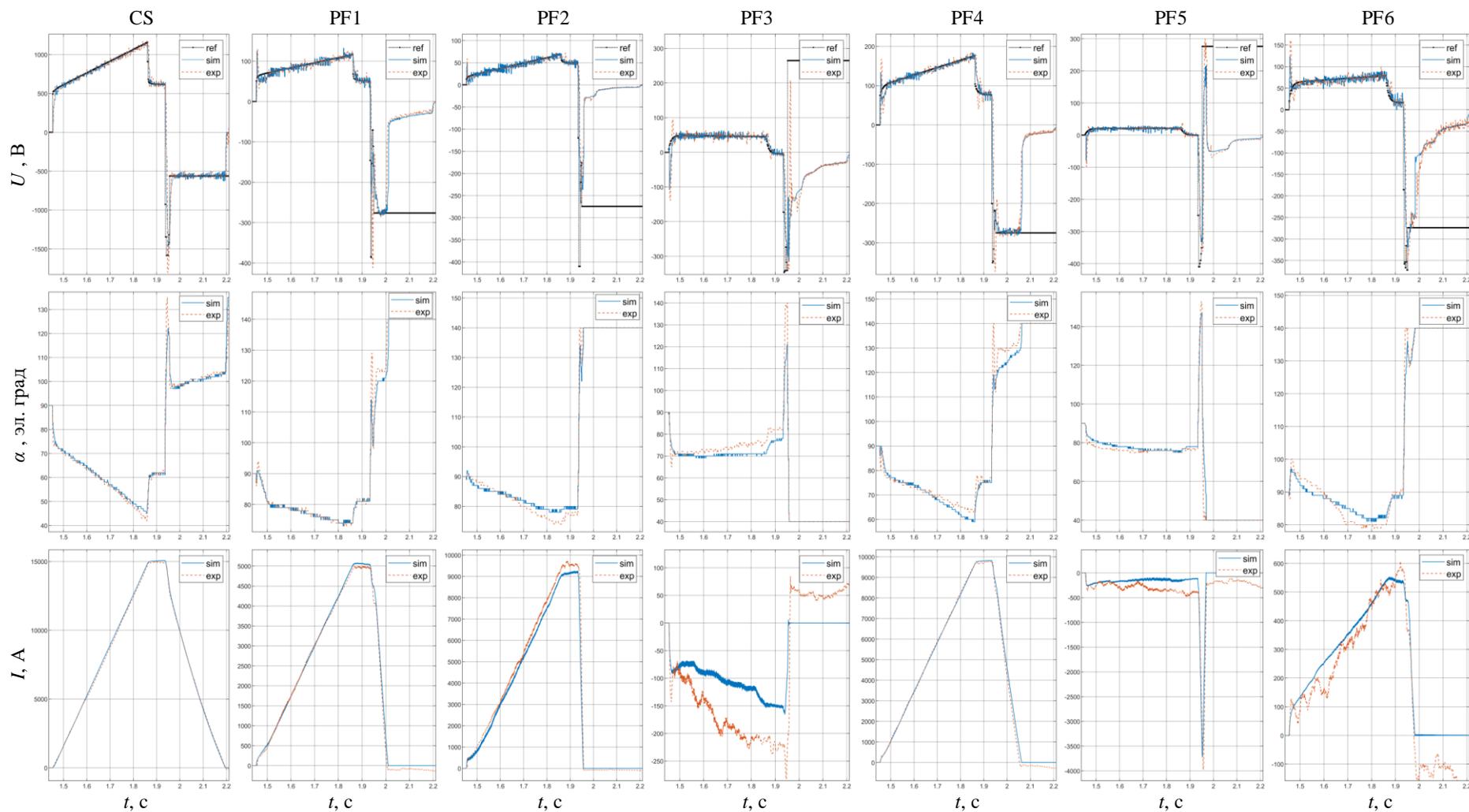


Рисунок В.5 – Сравнение результатов моделирования ИП CS, PF1–PF6 (sim) с экспериментальными данными разряда № 3575 (exp) [5]

Приложение Г. Разработка и верификация противоаварийных алгоритмов и алгоритмов по приведению системы электропитания установки КТМ в безопасное состояние

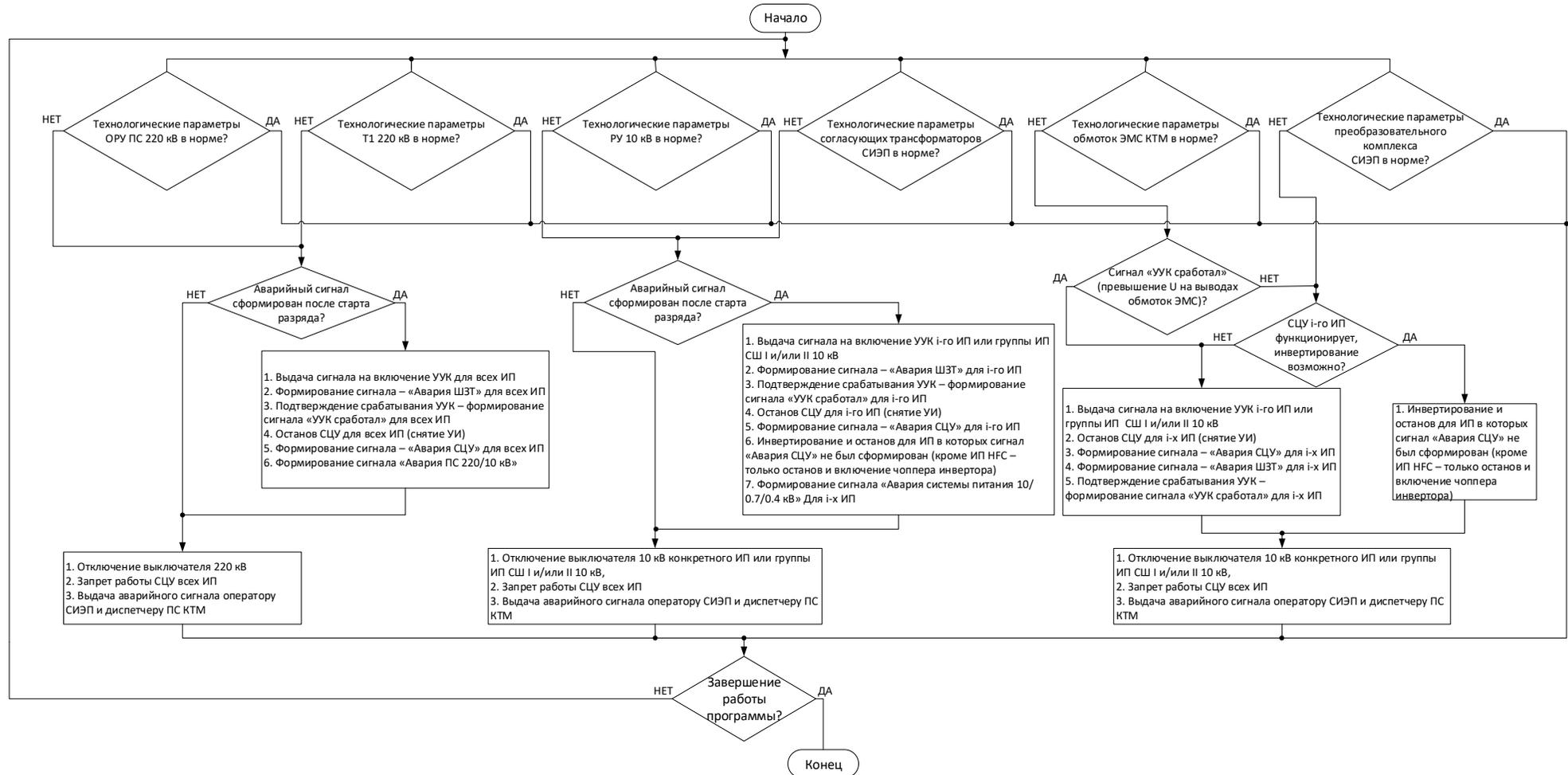


Рисунок Г.1 – Блок-схема алгоритма противоаварийного управления системы электропитания токамака КТМ

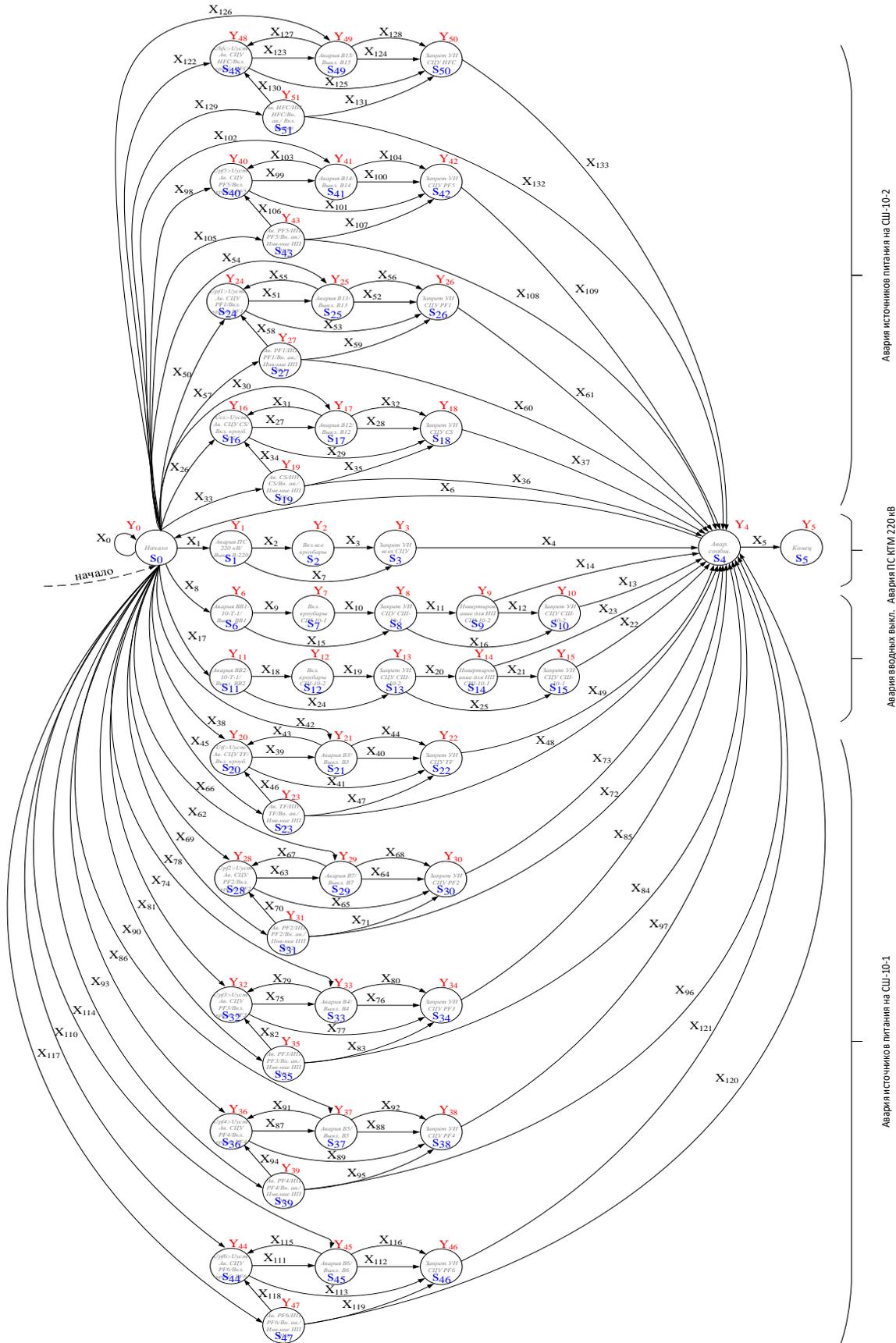


Рисунок Г.2 – Орграф синтезированного автомата Мура

Таблица Г.1 – Вектора аварий (красные фишки типа TFAIL)

№	Тип аварии	Вектор входного буфера BUFF IN (FAIL) аварийных ситуаций СПЗ (значение переменных красных фишек типа TFAIL начальной разметки сети Петри)
1.	Авария ПС 220 кВ (В-220-Т-1) до начала разряда (ток в обмотках отсутствует)	$1 \{ X0=no, x1=yes, x2=no, x3=no, x4=no, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=no, x41=no, cs=no, tf=no \} ++$
2.	Авария ПС 220 кВ (В-220-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS)	$1 \{ X0=no, x1=yes, x2=no, x3=no, x4=no, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=yes, x41=no, cs=no, tf=no \} ++$
3.	Авария ПС 220 кВ (В-220-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF)	$1 \{ X0=no, x1=yes, x2=no, x3=no, x4=no, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=no, x41=yes, cs=no, tf=no \} ++$
4.	Авария РУ 10кВ СШ-10-1 (ВВ1-10-Т-1) до начала разряда (ток в обмотках отсутствует)	$1 \{ X0=no, x1=no, x2=yes, x3=no, x4=no, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=no, x41=no, cs=no, tf=no \} ++$
5.	Авария РУ 10кВ СШ-10-1 (ВВ1-10-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS)	$1 \{ X0=no, x1=no, x2=yes, x3=no, x4=no, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=yes, x41=no, cs=no, tf=no \} ++$
6.	Авария РУ 10кВ СШ-10-1 (ВВ1-10-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF)	$1 \{ X0=no, x1=no, x2=yes, x3=no, x4=no, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=no, x41=yes, cs=no, tf=no \} ++$
7.	Авария РУ 10кВ СШ-10-2 (ВВ2-10-Т-1) до начала разряда (ток в обмотках отсутствует)	$1 \{ X0=no, x1=no, x2=no, x3=yes, x4=no, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=no, x41=no, cs=no, tf=no \} ++$
8.	Авария РУ 10кВ СШ-10-2 (ВВ2-10-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS)	$1 \{ X0=no, x1=no, x2=no, x3=yes, x4=no, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=yes, x41=no, cs=no, tf=no \} ++$
9.	Авария РУ 10кВ СШ-10-2 (ВВ2-10-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF)	$1 \{ X0=no, x1=no, x2=no, x3=yes, x4=no, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=no, x41=yes, cs=no, tf=no \} ++$
10.	Авария системы питания переменным током ИП CS (В12) до начала разряда (ток в обмотках отсутствует)	$1 \{ X0=no, x1=no, x2=no, x3=no, x4=yes, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=no, x41=no, cs=no, tf=no \} ++$
11.	Авария системы питания переменным током ИП CS (В12) после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS)	$1 \{ X0=no, x1=no, x2=no, x3=no, x4=yes, x5=no, x13=no, x14=no, x22=no, x23=no, x31=no, x32=no, x40=yes, x41=no, cs=no, tf=no \} ++$

№	Тип аварии	Вектор входного буфера BUFF IN (FAIL) аварийных ситуаций СПЗ (значение переменных красных фишек типа TFAIL начальной разметки сети Петри)
12.	Авария системы питания переменным током ИП CS (B12) после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=yes,x5=no,x13=no,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=yes,cs=no,tf=no } ++
13.	Авария системы питания переменным током ИП TF (B3) до начала разряда (ток в обмотках отсутствует)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=yes,x13=no,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=no,cs=no,tf=no } ++
14.	Авария системы питания переменным током ИП TF (B3) после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=yes,x13=no,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=yes,x41=no,cs=no,tf=no } ++
15.	Авария системы питания переменным током ИП TF (B3) после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=yes,x13=no,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=yes,cs=no,tf=no } ++
16.	Авария на обмотке CS / преобразовательном оборудовании ИП CS до начала разряда (ток в обмотках отсутствует)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=yes,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=no,cs=no,tf=no } ++
17.	Авария на обмотке CS / преобразовательном оборудовании ИП CS после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=yes,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=yes,x41=no,cs=no,tf=no } ++
18.	Авария на обмотке CS / преобразовательном оборудовании ИП CS после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=yes,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=yes,cs=no,tf=no } ++
19.	Авария на обмотке TF / преобразовательном оборудовании ИП TF до начала разряда (ток в обмотках отсутствует)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=yes,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=no,cs=no,tf=no } ++
20.	Авария на обмотке TF / преобразовательном оборудовании ИП TF после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=yes,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=yes,x41=no,cs=no,tf=no } ++
21.	Авария на обмотке TF / преобразовательном оборудовании ИП TF после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=yes,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=yes,cs=no,tf=no } ++
22.	Авария СЦУ ИП CS до начала разряда (ток в обмотках отсутствует)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=yes,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=no,cs=no,tf=no } ++

№	Тип аварии	Вектор входного буфера BUFF IN (FAIL) аварийных ситуаций СПЗ (значение переменных красных фишек типа TFAIL начальной разметки сети Петри)
23.	Авария СЦУ ИП CS после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=yes,x23=no,x31=no,x32=no,x40=yes,x41=no,cs=no,tf=no } ++
24.	Авария СЦУ ИП CS после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=yes,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=yes,cs=no,tf=no } ++
25.	Авария СЦУ ИП TF до начала разряда (ток в обмотках отсутствует)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=no,x23=yes,x31=no,x32=no,x40=no,x41=no,cs=no,tf=no } ++
26.	Авария СЦУ ИП TF после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=no,x23=yes,x31=no,x32=no,x40=yes,x41=no,cs=no,tf=no } ++
27.	Авария СЦУ ИП TF после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=no,x23=yes,x31=no,x32=no,x40=no,x41=yes,cs=no,tf=no } ++
28.	Напряжение на обмотке CS превысило уставку после начала разряда (ток отсутствует в обмотке TF)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=no,x23=no,x31=yes,x32=no,x40=yes,x41=no,cs=no,tf=no } ++
29.	Напряжение на обмотке CS превысило уставку после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=no,x23=no,x31=yes,x32=no,x40=yes,x41=yes,cs=no,tf=no } ++
30.	Напряжение на обмотке TF превысило уставку после начала разряда (ток отсутствует в обмотке CS)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=yes,x40=no,x41=yes,cs=no,tf=no } ++
31.	Напряжение на обмотке TF превысило уставку после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS)	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=yes,x40=yes,x41=yes,cs=no,tf=no }
№	Тип аварии	Вектор входного буфера BUFF IN (FAIL) аварийных ситуаций СПЗ (значение переменных генерируемых красных фишек типа TFAIL сети Петри)
32.	Внешняя авария для ИП TF	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=no,cs=no,tf=yes } ++
33.	Внешняя авария для ИП CS	1` { X0=no,x1=no,x2=no,x3=no,x4=no,x5=no,x13=no,x14=no,x22=no,x23=no,x31=no,x32=no,x40=no,x41=no,cs=yes,tf=no } ++

Таблица Г.2 – Вектора противоаварийных воздействий (синие фишки типа TACTION)

№	Выходное воздействие СПЗ	Вектор буфера BUFF OUT (ACTION) выходных воздействий СПЗ (значение переменных генерируемых синих фишек типа TACTION сети Петри)
1.	Отключение головного выключателя ПС 220 кВ (В-220-Т-1)	$1^{\setminus} \{y1=yes, y2=no, y3=no, y4=no, y5=no, y13=no, y14=no, y22=no, y23=no, y31=no, y32=no\}$
2.	Отключение вводного выключателя 10кВ СШ-10-1 (ВВ1-10-Т-1)	$1^{\setminus} \{y1=no, y2=yes, y3=no, y4=no, y5=no, y13=no, y14=no, y22=no, y23=no, y31=no, y32=no\}$
3.	Отключение вводного выключателя 10кВ СШ-10-2 (ВВ2-10-Т-1)	$1^{\setminus} \{y1=no, y2=no, y3=yes, y4=no, y5=no, y13=no, y14=no, y22=no, y23=no, y31=no, y32=no\}$
4.	Отключение линейного выключателя 10кВ системы питания переменным током ИП CS (В12)	$1^{\setminus} \{y1=no, y2=no, y3=no, y4=yes, y5=no, y13=no, y14=no, y22=no, y23=no, y31=no, y32=no\}$
5.	Отключение линейного выключателя 10кВ системы питания переменным током ИП TF (В3)	$1^{\setminus} \{y1=no, y2=no, y3=no, y4=no, y5=yes, y13=no, y14=no, y22=no, y23=no, y31=no, y32=no\}$
6.	Включение режима инвертирования для ИП CS	$1^{\setminus} \{y1=no, y2=no, y3=no, y4=no, y5=no, y13=yes, y14=no, y22=no, y23=no, y31=no, y32=no\}$
7.	Включение режима инвертирования для ИП TF	$1^{\setminus} \{y1=no, y2=no, y3=no, y4=no, y5=no, y13=no, y14=yes, y22=no, y23=no, y31=no, y32=no\}$
8.	Снятие (блокировка) управляющих импульсов для СЦУ преобразователей ИП CS	$1^{\setminus} \{y1=no, y2=no, y3=no, y4=no, y5=no, y13=no, y14=no, y22=yes, y23=no, y31=no, y32=no\}$
9.	Снятие (блокировка) управляющих импульсов для СЦУ преобразователей ИП TF	$1^{\setminus} \{y1=no, y2=no, y3=no, y4=no, y5=no, y13=no, y14=no, y22=no, y23=yes, y31=no, y32=no\}$
10.	Включение кроубара ИП CS	$1^{\setminus} \{y1=no, y2=no, y3=no, y4=no, y5=no, y13=no, y14=no, y22=no, y23=no, y31=yes, y32=no\}$
11.	Включение кроубара ИП TF	$1^{\setminus} \{y1=no, y2=no, y3=no, y4=no, y5=no, y13=no, y14=no, y22=no, y23=no, y31=no, y32=yes\}$

**Приложение Д. Копии актов внедрения, свидетельства о регистрации программы
для ЭВМ, протокол физического пуска установки КТМ**

Қазақстан Республикасы
Энергетика министрлігінің
**«ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ
ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫ»**
шаруашылық жүргізу құқығындағы
республикалық мемлекеттік кәсіпорны

071100, Қазақстан Республикасы,
ШҚО, Курчатов к., Бейбіт атом к-сі, 2Б
тел.: (722-51) 3-33-33, тел./факс: (722-51) 3-38-58
e-mail: nnc@nnc.kz



Республиканское государственное предприятие
на праве хозяйственного ведения
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»**
Министерства энергетики
Республики Казахстан

071100, Республика Казахстан,
ВКО, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
тел.: (722-51) 3-33-33, тел./факс: (722-51) 3-38-58
e-mail: nnc@nnc.kz

24.09.2020 № 01-12/147
На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор,
д.ф.-м.н., профессор, академик
КазНАЕН и НИА РК

Э.Г. Батырбеков

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Зарва Дениса Борисовича на комплексе токамака КТМ

Комиссией РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» в составе:

Председатель:

Витюк В.А. – заместитель генерального директора по науке, к.ф.-м.н.;

Члены комиссии:

Бакланов В.В. – первый заместитель директора филиала «Институт атомной энергии», к.т.н.;

Коровиков А.Г. – главный инженер филиала «Институт атомной энергии», к.т.н.;

Чектыбаев Б.Ж. – начальник отдела термоядерных исследований филиала «Институт атомной энергии», PhD,

составлен настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Зарва Дениса Борисовича «ТЕХНИЧЕСКОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ТОКАМАКА КТМ», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (атомная промышленность), внедрены на комплексе казахстанского материаловедческого токамака КТМ филиала «Институт атомной энергии» РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан».

Применение в данной работе оригинальных схмотехнических и алгоритмических решений позволили реализовать систему импульсного электропитания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ, оптимизировать её для нужд управления, реализовать безопасное управление электротехническим оборудованием комплекса с высокой степенью надежности и точности, что в

конечном итоге позволило реализовать требуемый сценарий плазменного разряда, успешно осуществить физический пуск установки КТМ и ввести комплекс в эксплуатацию.

Компьютерная имитационная модель системы импульсного электропитания совместно с её системой цифрового управления, разработанная автором, позволила безопасно для дорогостоящего силового электрооборудования верифицировать предложенные алгоритмы управления и осуществить синтез контура регулирования напряжения на обмотках электромагнитной системы установки КТМ. Данная модель позволяет анализировать все необходимые условия и параметры работы силового электрооборудования и его системы управления до загрузки очередного сценария плазменного разряда в систему автоматизации эксперимента комплекса КТМ.

Вместе с этим, автором предложены, верифицированы и внедрены в составе системы противоаварийной защиты алгоритмы противоаварийной защиты и приведения системы электропитания токамака КТМ в безопасное состояние. Для безопасной верификации данных алгоритмов применены современные методы формализации, а также компьютерное имитационное моделирование.

Комиссия считает, что внедрение результатов данной диссертационной работы на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ имеет высокую теоретическую и практическую значимость, поскольку позволяет обеспечить достижение требуемых параметров, устойчивость и повышение качества плазменных разрядов на установке КТМ, вместе с этим, позволяет расширить базу знаний в области технического, алгоритмического и информационного обеспечения систем управления источниками питания электрофизических установок, а также их имитационного компьютерного моделирования.

Экономический эффект от внедрения достигается за счет минимизации возможности возникновения аварии на дорогостоящем силовом электротехническом и технологическом оборудовании комплекса, минимизации времени локализации и устранения последствий возможной аварии, оптимальном использовании потребляемой системой электропитания токамака КТМ мощности.

Председатель комиссии



В.А. Витюк

Члены комиссии



В.В. Бакланов

А.Г. Коровиков

Б.Ж. Чектыбаев



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

АКТ
от 21.09.2020 № 420/18

УТВЕРЖДАЮ

О внедрении в учебный процесс результатов
диссертационного исследования Зарва Д.Б.

Директор Инженерной школы
ядерных технологий ТПУ



Комиссия в составе:

Председателя

Заведующий кафедрой - руководитель отделения ЯТЦ на правах кафедры А.Г. Горюнов

Членов комиссии:

Доцент отделения ЯТЦ

В.Ф. Дядик

Доцент отделения ЯТЦ

Е.В. Ефремов

Доцент отделения ЯТЦ

А.В. Обходецкий

рассмотрела результаты использования в учебном процессе диссертационных исследований аспиранта отделения ЯТЦ Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета Зарва Дениса Борисовича и составила настоящий акт об их внедрении.

Комиссия подтверждает, что разработанная в ходе диссертационных исследований программа Tokamak_Power_Control, предназначенная для имитационного моделирования системы импульсного электропитания электромагнитной системы токамака КТМ, внедрена в учебный процесс и используется при проведении лабораторных работ в рамках учебного курса «Системы автоматизации экспериментов на термоядерных установках».

Программа выполняет следующие функции: моделирование сценариев разряда без плазмы; синтез контуров управления источниками питания и токами в обмотках электромагнитной системы. Программа может применяться в научных исследованиях и

при проектировании систем импульсного электропитания и систем управления источниками питания термоядерных реакторов с магнитным удержанием плазмы.

Председатель
Члены комиссии:



А.Г. Горюнов

В.Ф. Дядик

Е.В. Ефремов

А.В. Обходский

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020619933

Имитационное моделирование системы импульсного электропитания электромагнитной системы токамака (Tokamak_Power_Control)

Правообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)*

Авторы: *Ли Алексей Михайлович (RU), Павлов Вадим Михайлович (RU), Федин Сергей Владимирович (RU), Зарва Денис Борисович (KZ), Дериглазов Алексей Алексеевич (RU)*

Заявка № 2020619030

Дата поступления 17 августа 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 августа 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по перспективным ядерным технологиям НИЦ «Курчатовский институт» Российской Федерации


 А.А. Ковалицин
 « 20 » ноября 2019 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» Министерства энергетики Республики Казахстан


 Э.Г. Батырбеков
 « 20 » ноября 2019 г.

ПРОТОКОЛ

по подготовке и проведению второго (заключительного) этапа физического пуска токамака КТМ

В соответствии с утвержденной Программой (№01-600-22/653вн от 25.04.2017) физического пуска Казахстанского материаловедческого токамака КТМ (далее - КТМ) целью второго (заключительного) этапа физического пуска являлось получение плазменного разряда с использованием всех необходимых штатных технологических систем комплекса КТМ. На данном этапе проведена демонстрация работоспособности установки токамак КТМ с получением плазмы в омическом режиме на пониженных параметрах. В рамках данного этапа проведена отработка начальной фазы сценария плазменного разряда и получения пробоя, а также отработка сценария развития плазменного шнура и достижение параметров плазменного разряда соответствующих расчетным значениям. Расчеты сценария пробоя осуществлены с использованием расчетного кода TRANSMAK (НИИЭФА им. Ефремова). Расчеты эволюции плазменного шнура проведены с использованием расчетного кода DINA (НИЦ Курчатовский институт, ТРИНИТИ).

В работах приняли участие специалисты Национального Ядерного Центра Республики Казахстан (далее – РГП НЯЦ РК), а также Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий Национального Исследовательского Центра «Курчатовский Институт» (далее – ККТЭ и ПТ НИЦ КИ) Российской Федерации.

Перед проведением экспериментов по получению плазменных разрядов было проведено кондиционирование вакуумной камеры (двухнедельный прогрев при температуре 130°C и очистка тлеющим разрядом в среде инертных газов аргона и

гелия), которое позволило получить давление остаточных газов в вакуумной камере КТМ до $3 \cdot 10^{-7}$ Торр. Масс-спектрометрические измерения остаточных газов в вакуумной камере КТМ показали незначительный уровень воды, при этом основным компонентом остаточного газа являлся азот.

В процессе экспериментов проведено численное моделирование сценария плазменного разряда, сравнение расчетов с результатами экспериментов и корректировка сценария токов в обмотках электромагнитной системы КТМ с целью достижения требуемых параметров плазменного разряда.

Для измерения параметров плазмы, полученной в результате экспериментов, были применены следующие диагностики: электромагнитные датчики, обзорный болометр, AXUV-монитор, обзорный спектрометр, монитор интенсивности излучения линии водорода $H\alpha$ - $D\alpha$, перестраиваемый импульсный рефлектометр, многоканальный бесшумный интерферометр, монитор среднечордовой плотности плазмы, система видеонаблюдения за плазмой.

В рамках проведения второго (заключительного) этапа физического пуска токамака КТМ были достигнуты следующие параметры плазменного разряда:

- максимальный ток в импульсе плазменного разряда $I_p \approx 100$ кА;
- длительность импульса плазменного разряда $t \approx 65$ мс;
- тороидальное поле на радиусе $R=0,9$ м $B_t=0,88$ Тл;
- максимальная линейная плотность плазмы $\langle n_e l \rangle = 5 \cdot 10^{18}$ м⁻².

В качестве рабочего газа использовался водород.

Основные цели заключительного этапа физического пуска токамака КТМ достигнуты.

Результаты физического пуска КТМ приведены в Приложении 1.

Разработаны рекомендации по проведению дальнейших экспериментов в целях улучшения параметров плазменного разряда на КТМ.

СОГЛАСОВАНО

Научный руководитель ККТЭ и ПТ

НИЦ КИ



П.П. Хвостенко

Научный сотрудник ККТЭ и ПТ



И.С. Бельбас

СОГЛАСОВАНО

Главный инженер РГП НЯЦ РК



С.С. Локштанов

Начальник УИП РГП НЯЦ РК



Д.Б. Зарва

Ведущий инженер ККТЭ и ПТ

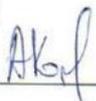
 В.Н. Доука
Научный сотрудник ККТЭ и ПТ

 Д.С. Сергеев
Старший научный сотрудник
ККТЭ и ПТ

 Д.В. Рыжаков

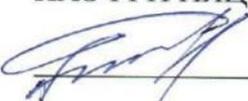
Первый заместитель директора филиала
ИАЭ РГП НЯЦ РК

 В.В. Бакланов
Главный инженер филиала ИАЭ РГП
НЯЦ РК

 А.Г. Коровиков
Главный научный сотрудник филиала
ИАЭ РГП НЯЦ РК

 И.Л. Тажибаева

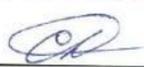
Главный специалист по инженерно-
техническому сопровождению филиала
ИАЭ РГП НЯЦ РК

 В.В. Яковлев
Начальник отдела 420 филиала ИАЭ
РГП НЯЦ РК

 В.И. Савкин
Начальник отдела 460 филиала ИАЭ
РГП НЯЦ РК

 Д.А. Ольховик
Начальник отдела 280 филиала ИАЭ
РГП НЯЦ РК

 Б.Ж. Чектыбаев
Начальник лаборатории 281 филиала
ИАЭ РГП НЯЦ РК

 А. Д. Садыков