

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)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

**Научный руководитель –** кандидат технических наук, доцент  
**Павлов Вадим Михайлович**

**Официальные оппоненты:** **Ганджа Тарас Викторович**  
доктор технических наук, профессор, кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

**Кутеев Борис Васильевич**  
доктор физико-математических наук, профессор, заместитель руководителя отделения токамаков по гибридным реакторам Комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Защита диссертации состоится «08» октября 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.16, созданного на базе Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) по адресу 634028 г. Томск, пр. Ленина 2, 10-й корпус, ауд. 340.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИ ТПУ по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53а, а также на официальном сайте НИ ТПУ: <https://portal.tpu.ru/council/indcouncils/6067/worklist>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

**Ученый секретарь**  
**диссертационного совета**



**Надеждин Игорь Сергеевич**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **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. Условие возникновения и качество плазменного разряда в установке токамак напрямую зависит от возможности реализации довольно сложной диаграммы эволюции токов в обмотках её электромагнитной системы. С этой целью, для казахстанского материаловедческого токамака КТМ, являющегося одной из базовых установок Национального ядерного центра Республик Казахстан (г. Курчатов), создана специализированная система импульсного электропитания, представляющая собой сложный, распределенный электротехнический комплекс с собственной системой цифрового управления.

Создание системы импульсного электропитания токамака, как исполнительного механизма системы управления плазмой с необходимым техническим, математическим и информационным обеспечением представляет собой нетривиальную научно-техническую задачу. Необходимо учитывать требования, предъявляемые к такой системе со стороны сценариев изменения тока в обмотках токамака, ограничения, накладываемые со стороны питающей сети и нагрузки. Учитывая, что в процессе плазменного разряда система импульсного электропитания КТМ будет обеспечивать управление потоками мощности на уровне 126 МВА - необходимо обеспечить согласованную и безаварийную работу всего используемого электрооборудования.

Диссертационная работа посвящена исследованию процессов, протекающих в контуре электропитания электромагнитной системы токамака КТМ, созданию системы импульсного электропитания как исполнительного механизма системы управления плазмой, разработке и внедрению алгоритмов управления, диагностики и противоаварийной защиты электротехнического оборудования комплекса КТМ. Учитывая перспективы развития термоядерной энергетики - необходимость создания эффективных систем импульсного электропитания для термоядерных реакторов будущего, а также разработки и развития технического, математического и информационного обеспечения их систем управления является весьма актуальной задачей.

**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, 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 исследования** является система электропитания обмоток электромагнитной системы КТМ, как исполнительный механизм системы управления плазмой.

**Предметом исследования** являются схемотехнические решения, алгоритмы и методы управления преобразовательным оборудованием систем импульсного электропитания сверхмощных электрофизических установок, алгоритмы противоаварийной защиты и приведения электротехнического 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/Simscapе 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 электропитания КТМ, как элементов системы управления плазмой, позволяющие улучшить динамические параметры системы управления, осуществлять с использованием предложенных и математически описанных алгоритмов оперативную диагностику всех её элементов в режиме реального времени. Реализована нехарактерная для других токамаков схема ключа-прерывателя постоянного тока, базирующаяся исключительно на полупроводниковых приборах и его подсистема управления, позволяющие переключать ток в обмотке центрального соленоида КТМ в минимально возможное время с высокой степенью надежности;
2. Разработана аналитическая компьютерная модель источников электропитания КТМ, позволяющая моделировать и анализировать режимы работы системы при различных вариантах сценария плазменного разряда с целью

выявления возможных аварийных ситуаций до загрузки сценария в реальную систему управления, осуществлять синтез и настройку контуров управления источниками питания;

3. Предложены, верифицированы при помощи модели и внедрены алгоритмы управления источниками электропитания обмоток КТМ, в том числе обмотки центрального соленоида, использующий в процессе реверса тока как отдельный, так и совместный режим управления встречными комплектами преобразователей, обеспечивающий их согласованную работу с ключом-прерывателем постоянного тока с целью получения максимально возможной производной тока в обмотке на стадии пробоя рабочего газа и подъема тока плазмы, а также эффективного использования мощности из питающей электросети;

4. Реализована имитационная компьютерная модель системы противоаварийной защиты энергокомплекса КТМ. Предложены, верифицированы и внедрены алгоритмы противоаварийной защиты системы электропитания КТМ, отличающиеся от известных применением при их формализации раскрашенных временных сетей Петри.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Схемотехнические решения источников электропитания КТМ, как элементы системы управления плазмой. Алгоритмы диагностики электрооборудования КТМ. Положение соответствует пунктам: 14 и 18 паспорта научной специальности 05.13.06;

2. Компьютерная аналитическая модель системы электропитания токамака КТМ. Положение соответствует пунктам: 4 и 6 паспорта специальности 05.13.06;

3. Алгоритмы управления источниками электропитания КТМ, в том числе обмотки центрального соленоида. Положение соответствует пунктам: 4 и 18 паспорта специальности 05.13.06;

4. Компьютерная имитационная модель системы противоаварийной защиты и соответствующие алгоритмы защиты электроэнергетического комплекса КТМ. Положение соответствует пунктам: 4 и 16 паспорта специальности 05.13.06.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Система импульсного электропитания успешно внедрена в составе электроэнергетического комплекса токамака КТМ. При помощи, разработанной компьютерной модели исследованы режимы работы системы, верифицированы и внедрены в составе системы цифрового управления источниками электропитания предложенные алгоритмы управления. Разработана компьютерная 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 схемотехническую базу систем импульсного электропитания сверхмощных электрофизических установок, базу математического и информационного обеспечения их систем управления, а

также круг унифицированных решений для задач моделирования технологических процессов, их систем управления и противоаварийной защиты.

**Степень достоверности и апробация результатов** подтверждена успешным испытанием системы импульсного электропитания совместно с её системой цифрового управления и противоаварийной защиты во время проведения физического пуска токамака КТМ 20 ноября 2019 г., а принятые в работе авторские решения основаны на анализе практики и обобщении передового опыта, проверенных методах исследований в области автоматического управления, теории математического моделирования, силовой электроники и электротехники.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных научных конференциях: IAEA TM on Research Using Small Fusion Devices (Казахстан, г. Курчатов, 2009 г.), «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (г. Томск, 2015, 2019 гг.), International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion, Kazakhstan (Казахстан, г. Астана, 2016 г.), Inter. Sci. and Tech. Conf. «Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power (г. Москва, 2016 г.), «Газоразрядная плазма и её применение», (г. Новосибирск, 2017 г.), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2018 г.), «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (Казахстан, г. Курчатов, 2018 г.), «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики (г. Москва, 2018 г.).

**Публикации** по теме диссертационного исследования 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.

**Личный вклад автора.** Основные исследования по теме диссертации выполнены автором лично, либо при непосредственном его участии. Выбор направления исследований выполнен совместно с научным руководителем.

**Диссертационная работа выполнялась в рамках** реализации: Республиканской бюджетной программы РК (005, 059, 045 и 106) «Создание Казахстанского термоядерного материаловедческого реактора Токамак КТМ»; НИОКР «Совершенствование системы управления плазмой, сбора и обработки экспериментальных данных Казахстанского материаловедческого токамака (КТМ)» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор RFMEFI58519X0007), а также других государственных и международных научно-технических программ.

#### **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.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится обоснование актуальности темы, обозначаются цели и задачи исследования, формулируются научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, приводится краткое описание диссертации по главам.

**Первая глава** посвящена исследованию объекта управления, характеристик электромагнитной системы (ЭМС) установки КТМ (рисунок 1), параметров базового (рассчитанного на номинальный режим работы КТМ) сценария плазменного разряда, накладывающих императивные требования к системе импульсного электропитания (СИЭП) КТМ, как к исполнительному механизму системы управления плазмой (СУП).

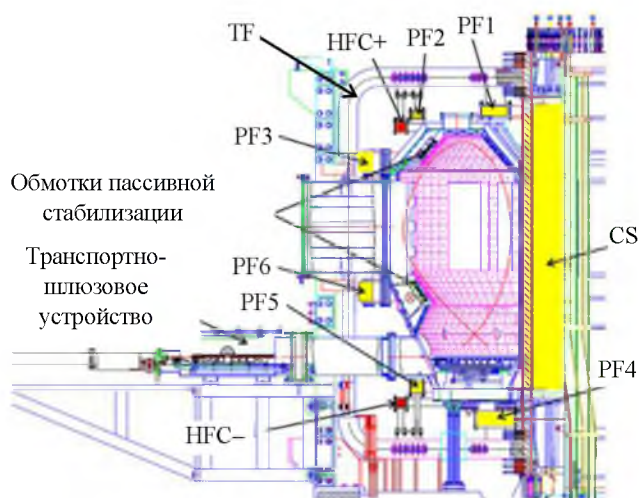


Рисунок 1 – Сечение токамака КТМ

На рисунке 1 изображены: обмотка центрального соленоида (CS), обмотки полоидальных полей (PF1—PF6), обмотка тороидального поля (TF) и обмотки быстрого управления плазмой по вертикали (HFC +/- (up/d)).

На основании имеющихся данных (размеры обмоток, их пространственное расположение и электротехнические параметры, диаграммы изменения напряжений и токов в обмотках для базового сценария плазменного разряда)

определены характеристики ЭМС КТМ (таблица 1) и диапазоны изменения мощности в контуре её электропитания. Выявлено что в процессе разряда полная мощность, потребляемая СИЭП КТМ из сети, не превышает 126 МВА.

Таблица 1 - Электротехнические параметры ЭМС КТМ

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	0,689	0,131	0,730	0,444	0,255	0,812	0,114
PF1	0	0,689	2,900	0,189	0,597	0,021	0,033	0,245	0,660
PF2	0	0,131	0,189	0,520	0,607	0,016	0,026	0,198	0,932
PF3	0	0,730	0,597	0,607	11,800	0,165	0,273	2,207	3,210
PF4	0	0,444	0,021	0,016	0,1657	3,500	0,415	0,447	-0,805
PF5	0	0,255	0,033	0,026	0,2737	0,415	1,250	0,795	-1,740
PF6	0	0,812	0,245	0,198	2,207	0,447	0,795	11,800	-0,674
HFC	0	0,114	0,660	0,932	3,210	-0,805	-1,740	-0,674	17,019
Сопротивления обмоток ЭМС									
Обмотка	TF	CS	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	HFC
$R$ , мОм	6,8	31,2	10,5	5,4	29,0	8,0	8,4	29,0	202,6

Проведен анализ мирового опыта создания СИЭП и их систем управления (СУ) для установок типа токамак. Обоснована необходимость разработки нестандартных электротехнических устройств и комплектующих в каждом

конкретном случае. Выявлены положительные и отрицательные стороны отдельных решений, определены возможности и направления по их развитию и улучшению, а также возможность расширения технической и математической базы СУ и противоаварийной защиты (СПЗ) сверхмощных источников импульсного электропитания (ИП). Применительно к токамаку КТМ:

- Выявлена необходимость создания специализированного AC/DC преобразователя, обозначена проблема деления токов в параллельно соединенных силовых полупроводниковых приборах (СПП) и необходимость их оперативной диагностики;

- Определена необходимость прерывания постоянного тока 30 кА в ИП обмотки CS с целью включения в контур её электропитания балластного сопротивления на этапе пробоя рабочего газа и подъема тока плазмы. Поставлена задача реализовать ключ-прерыватель без использования электромеханических схем;

- Обозначена необходимость разработки специализированных алгоритмов управления и противоаварийной защиты, выявлено отсутствие комплексного подхода при внедрении СПЗ подобных энергокомплексов в целом.

Определены основные направления и методы исследований, а также подход к разработке требований к СИЭП токамака КТМ, как к исполнительному механизму СУП, с целью обеспечения для него необходимых статических и динамических характеристик. Учтены диапазоны и скорости изменения токов в обмотках ЭМС КТМ и требуемые для этого диапазоны изменения напряжений для отдельных ИП КТМ.

Учитывая финансовую стоимость СИЭП КТМ, опасность и трудоемкость ликвидации возможных аварий – в целях её внедрения, разработки и отладки соответствующих алгоритмов управления и противоаварийной защиты обоснована необходимость применения методов аналитического и имитационного компьютерного моделирования.

Во **второй главе** особое внимание уделено разработке и оптимизации для целей управления и диагностики СИЭП КТМ, как исполнительного механизма СУП. Определены основные требования к СИЭП и соответствующей СУ. Приведена и описана структурная схема электроэнергетического комплекса КТМ (рисунок 2), основные электротехнические решения и характеристики ИП, их функции, проектные режимы работы, а также используемое в их составе электротехническое оборудование.

В связи с отсутствием типовых образцов отдельных электротехнических комплектующих, удовлетворяющих требованиям компоновки СИЭП КТМ, разработано нестандартное оборудование: тиристорный AC/DC преобразователь – основная структурная единица СИЭП КТМ, полупроводниковый ключ-прерыватель постоянного тока в составе ИП обмотки CS, а также однофазный мостовой инвертор напряжения в составе ИП обмоток HFC.

На рисунке 2 представлены: понижающие трансформаторы 10/0,7 кВ, мощностью 31,2 МВА каждый (Т1 и Т2); трансформаторы 10/0,4 кВ, 6,3 МВА (Т3-Т9); тиристорные преобразователи 15 МВт (ТП); ключ-прерыватель постоянного



тока на 30 кА; инвертор напряжения 3 МВт, 1 кГц (ОИ); уравнивательная и ограничительная реакторная группа (УР) и др. Все вышеперечисленное силовое электрооборудование подключено напрямую к питающей электросети через головной трансформатор 220/10 кВ (Т).

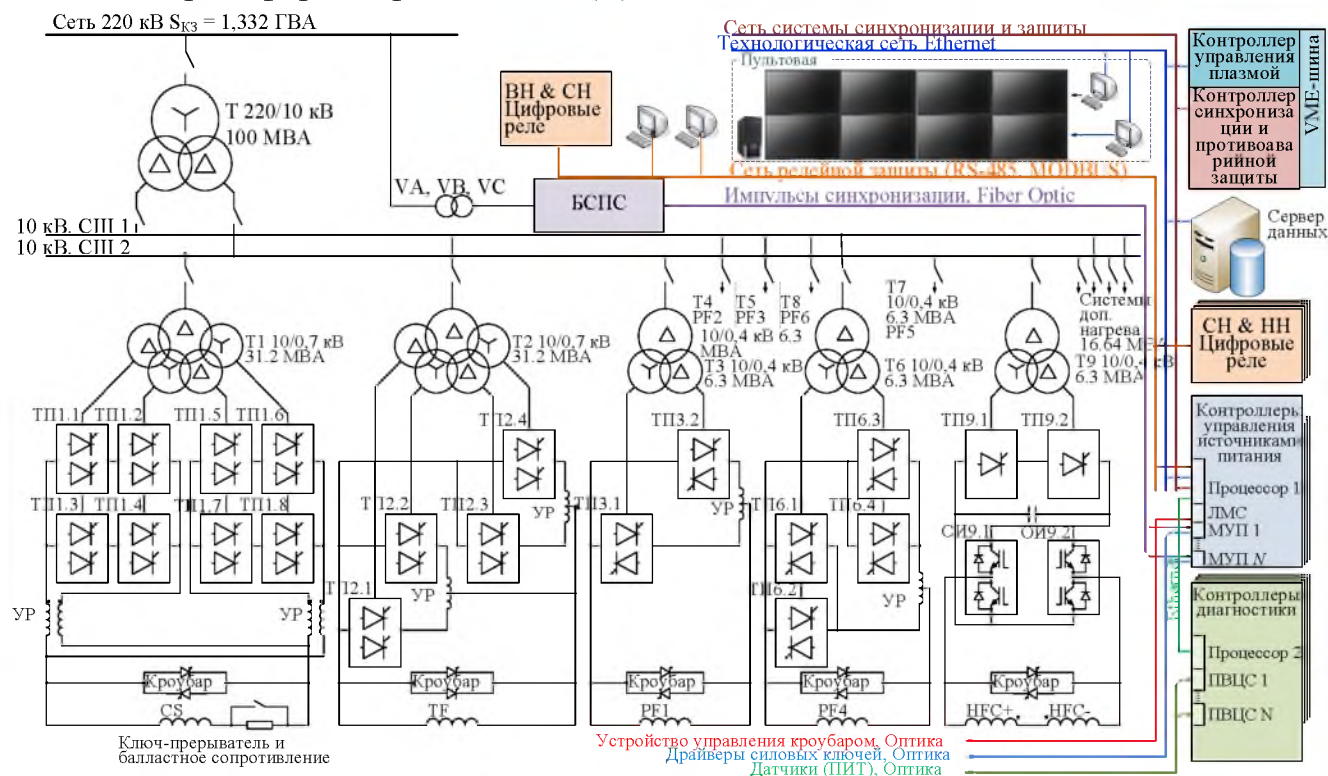


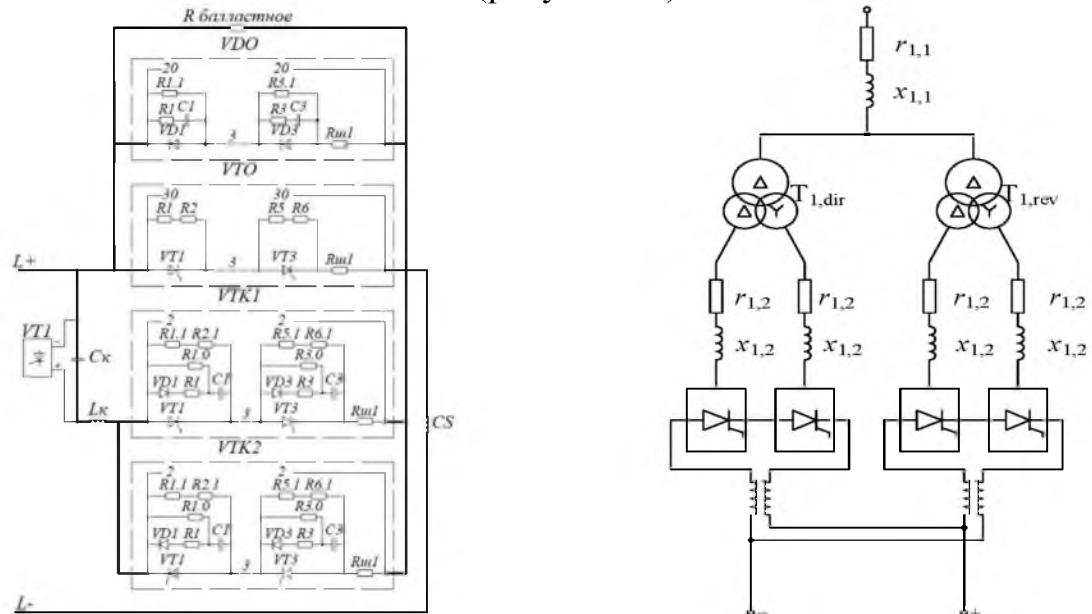
Рисунок 2 – Структурная схема системы электропитания КТМ совместно с её системой управления и противоаварийной защиты

В работе применено довольно оригинальное для высокоомощных AC/DC преобразователей решение проблемы распределения тока по параллельно соединенным СПП с использованием кремниевых резисторов  $R = 0,001$  Ом, соединенных с каждым тиристором последовательно. 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). По всем используемым в СИЭП КТМ ТП коэффициент неравномерности распределения тока составил 6%, тогда как в преобразователях схожего назначения аналогичный коэффициент считается приемлемым на уровне 20% (JET, ITER, JT-60SA и др). 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.

Разработан специализированный ключ-прерыватель (ТК) на постоянный ток 30 кА в составе ИП обмотки CS (рисунок 3а). Отличие от схожих решений (ITER, EAST, JT-60SA и др.) заключается в применении в качестве коммутирующих и проводящих элементов исключительно СПП без использования электромеханических шунтирующих схем. ТК работает под управлением собственной подсистемы управления и диагностики, интегрированной в СУ ИП обмотки CS. В ходе экспериментов достигнуто устойчивое прерывание 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. В схеме ТК предусмотрены: главная тиристорная сборка VTO, коммутирующая сборка VTK1, сборка перезаряда коммутирующей емкости VTK2, коммутирующая емкость с дросселем  $C_k$  и  $L_k$ , зарядное устройство VT1, главная диодная сборка VDO («обратная» по отношению к полярности ИП CS).

В целях реализации компьютерной аналитической модели СИЭП КТМ в среде Simulink/Simscape системы Matlab разработаны и оптимизированы необходимые схемы замещения ИП (рисунок 3б).



а) принципиальная схема ключа-прерывателя

б) схема замещения ИП CS

Рисунок 3 – Схемы электрооборудования ИП CS

Рассчитаны и переведены в относительные единицы Matlab электротехнические параметры оборудования энергокомплекса КТМ: параметры точки подключения к энергосистеме, ВЛЭП 220 кВ, шинных мостов, шинпроводов и кабельных линий, трансформаторов и уравнивающих реакторов, преобразовательного и иного электрооборудования. 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, описаны в ходе расчета электротехнических параметров оборудования.

Работа, представленная во второй главе, позволила перейти к разработке комплексной аналитической компьютерной модели СИЭП КТМ совместно с её СУ, разработке, верификации и внедрению соответствующих алгоритмов управления и диагностики.

В **третьей** главе представлено детальное описание моделируемой системы цифрового управления (СЦУ) источниками электропитания КТМ (рисунок 2), приведен перечень используемого в её составе оборудования и описаны его функции (таблица 2).

Таблица 2 – Перечень оборудования СЦУ, описываемого в работе

Устройство	Расшифровка и описание функций
БСПС	Блок синхронизации с питающей сетью
ПЦВС	Модуль ввода цифровых сигналов (прием цифровых пакетов телеметрии)
МУП	Модуль управления преобразователем (импульсно-фазовое управление, ШИМ)
ПИТ	Преобразователь измерительный телеметрический

В рамках проведенных исследований адаптирован к условиям КТМ, верифицирован и внедрен алгоритм синхронного вертикального импульсно-фазового управления оборудованием СИЭП, учитывающий его реальную конфигурацию: фазовые сдвиги обмоток питающих трансформаторов, диапазон ограничения углов управления, требуемую ширину и количество управляющих импульсов, и другие необходимые параметры.

Приведено математическое описание предложенных алгоритмов диагностики электрооборудования (перегрузка СПП, дисбалансы токов в плечах преобразователей и др.). К примеру, дисбаланс токов в параллельно соединенных СПП преобразователей КТМ определяется из соотношения:

$$\Delta I_{X,Y}^{i,j} = \left| \frac{\frac{1}{3} \sum_{r=1}^3 I_{X,Y}^{i,r} - I_{X,Y}^{i,j}}{\frac{1}{3} \sum_{r=3}^3 I_{X,Y}^{i,r}} \right| \quad (1)$$

где:  $X$  – номер ИП;  $Y$  – номер ТП;  $\Delta I_{X,Y}^{i,j}$  – ток  $j$ -го тиристора ( $j=1...3$ ) в  $i$ -той преобразовательной секции ( $i=1...12$ ) ТП $_{X,Y}$ .

В целях реализации требуемой диаграммы изменения тока в обмотке CS, а также минимизации потребляемой из сети мощности, предложен, верифицирован и внедрен алгоритм управления ИП CS (рисунок 4), сочетающий в себе совместный и отдельный режим управления встречно-направленными комплектами ТП, в режиме реверсирования тока, с использованием ТК в контуре электропитания.

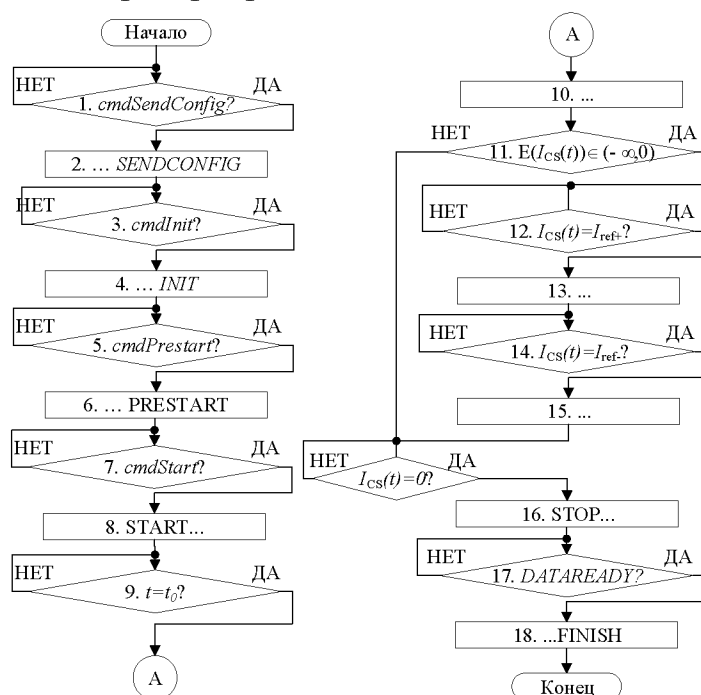


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма управления источником питания обмотки CS

Блоки 1 – 7 и 16 – 18, представленные на рисунке 4 отвечают за подготовку СЦУ к проведению эксперимента и пост-экспериментальную обработку данных. В процессе проведения эксперимента для СЦУ ИП CS характерна следующая последовательность действий (см. рисунок 2, 3а, 4 и 6):

8. Включение импульсно-фазового управления, включение сборки ВТО ТК, ввод тока в режиме отдельного управления ТП $_{1.1-1.8}$  в обмотку комплектом ТП $_{1.1-1.4}$  до уровня уставки и его стабилизация;

9. Ожидание старта разряда ( $t_{раз}=t_0$ );
10. Переключение комплекта ТП<sub>1.1-1.4</sub> в режим инвертирования тока в сеть, отключение сборки VTO ТК, перекоммутация тока на балластное сопротивление  $R_{bal}$ , начало вывода тока из обмотки через  $R_{bal}$ ;
11. Если реверс тока в обмотке не предусмотрен сценарием разряда, при  $I_{cs}(t)=0$  переход к этапу 16, в противном случае к этапу 12;
12. Ожидание значения тока в обмотке, равного уставке (+5 кА);
13. Подключение комплекта ТП<sub>1.5-1.8</sub>, работа ТП<sub>1.1-1.8</sub> в совместном режиме управления для осуществления перехода тока в обмотке через нулевое значение без токовой паузы (после чего ток начинает протекать через сборку VDO ТК);
14. Ожидание значения тока в обмотке, равного уставке (-5 кА);
15. Отключение комплекта ТП<sub>1.1-1.4</sub>, переход в режим раздельного управления, ввод и вывод тока «обратной полярности» из обмотки комплектом ТП<sub>1.5-1.8</sub> согласно сценарию разряда.

В целях реализации контура управления напряжением проведено исследование статических и динамических характеристик ИП КТМ. Статические характеристики в основном определяются зависимостью напряжения от различных значений угла управления и тока в нагрузке  $U_d = f(\alpha, I_d)$ . Динамические характеристики выражаются в дискретности:  $T_{ИП} = \frac{1}{mf_0}$ , где  $m$  – пульсность

преобразователей (для КТМ  $m=12$ ),  $f_0$  – частота питающей сети (50 Гц), а также неполной управляемости, связанной с различием характера изменения выходного напряжения при изменении угла управления  $\alpha$  с определенной скоростью и знаком. При увеличении  $\alpha$  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.

Рабочая частота управляющего воздействия ограничена частотой:  $f_{гр} = \frac{mf_0}{2}$ , во избежание перехода замкнутой СУ в автоколебательный режим работы.

Определены четыре существенно различающихся режима работы ТП, границы которых определяются значением угла коммутации  $\gamma = f(\alpha, I_d)$ : 1)  $\gamma < 30^\circ$ , 2)  $\gamma = 30^\circ$ , 3)  $30^\circ < \gamma < 60^\circ$ , 4)  $\gamma \geq 60^\circ$ . Внешние характеристики ИП КТМ целесообразно строить для режима № 1 ( $\gamma < 30^\circ$ ), относящегося к нормальному режиму работы.

Учитывая параметры нагрузки внешняя характеристика ИП КТМ выражается как:

$$U_d = U_{d0} \cos(\alpha) - \Delta U_X(I_d) - \Delta U_R(\gamma, I_d) - \Delta U_B, \quad (2)$$

где:  $\alpha$  – угол управления,  $U_{d0}$  – напряжение холостого хода ТП при  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\Delta U_X$  – индуктивное падение напряжения в цепи коммутации,  $\Delta U_R$  – активное падение напряжения на элементах схемы,  $\Delta U_B$  – падение напряжения на СПП ТП. Поскольку  $\Delta U_X \gg \Delta U_R, \Delta U_B$ , то  $\Delta U_R$  и  $\Delta U_B$  можно пренебречь.

Таким образом, выявлено что статические и динамические характеристики ИП КТМ существенно нелинейные, что необходимо было учесть в процессе синтеза замкнутой СУ напряжением в целях обеспечения её устойчивости.

Учитывая, что основным режимом работы (без использования вышестоящей СУП) для СЦУ ИП КТМ является регулирование средневывырямленного

напряжения - реализован соответствующий контур автоматического управления. В данном режиме, транслируемые в момент конфигурации СЦУ уставки напряжения, рассчитываются вышестоящей СУП уже с учетом взаимного влияния обмоток ЭМС и плазмы.

Выявлено, что изменение угла управления  $\alpha$  на  $1^\circ$  в определенном диапазоне приводит к ощутимому изменению напряжения и соответственно тока в нагрузке. Данный эффект максимально выражен для ИП CS, у которого в диапазоне  $\alpha \approx 90^\circ$  ступенчатое изменение напряжения составляет  $\sim 40$  В. С учетом вышеизложенного, определены структура и основные требования к синтезируемому цифровому регулятору напряжения:

- передаточная функция замкнутой СУ  $W(s)$  должна быть  $\approx 1$ , в масштабах времени, определенных постоянными времени нагрузки;
- статическая ошибка регулирования должна стремиться к нулю;
- в структуре регулятора необходимо предусмотреть схему противонакопления во избежание эффекта насыщения регулятора;
- колебания угла управления  $\alpha$  при постоянной уставке не должны приводить к автоколебательному режиму работы СУ.

Реализован синтез цифрового ПИ регулятора напряжения, поскольку он обладает требуемым астатизмом, вместе с этим для него известно довольно много методов настройки. Выходное напряжение ИП определяется как:

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

Зная текущую величину тока в нагрузке  $I_d$ , падение напряжения  $\Delta U_X$  возможно скомпенсировать (использованием СУ с компенсацией по возмущению). Поскольку прямое измерение тока в нагрузке для СЦУ ИП КТМ не доступно,  $\Delta U_X$  будем считать возмущением. Внешней характеристикой невозмущенного объекта является выходное напряжение ИП в режиме ХХ. Данная характеристика использована для линеаризации объекта управления, при этом угол  $\alpha'$  вычисляется как:

$$\alpha' = \arccos\left(\frac{\pi U'_{reg}}{3\sqrt{2} U_{2л}}\right) \quad (4)$$

В целях предотвращения аварий ТП, таких как опрокидывание и прорыв инвертора, угол управления должен быть ограничен:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{min}, & \alpha' < \alpha_{min}, \\ \alpha', & \alpha_{min} \leq \alpha' \leq \alpha_{max}, \\ \alpha_{max}, & \alpha' > \alpha_{max}, \end{cases} \quad (5)$$

тем самым вводя ограничение на диапазон изменения выходной координаты регулятора -  $U_{reg}$ . Максимальная величина угла управления  $\alpha_{max}$  ограничивается в соответствии с соотношением  $\alpha_{max} + \gamma + \delta \leq 180^\circ$ , где  $\delta$  (время восстановления запирающих свойств тиристоров) консервативно принимается равной примерно  $5^\circ-10^\circ$ . Минимальное значение  $\alpha_{min}$  принимается  $\geq 2^\circ$ , учитывая особенность асинхронной работы МУП и БСПС.

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

$$W_{\text{ПИ}}(z) = k \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{и}}} \frac{T_s}{2} \frac{z+1}{z-1} \right), \quad (6)$$

где  $T_s$  – цикл управления,  $T_{\text{и}}$  – время интегрирования,  $k$  – коэффициент передачи. На рисунке 5 отображена структурная схема СУ напряжением ИП КТМ.

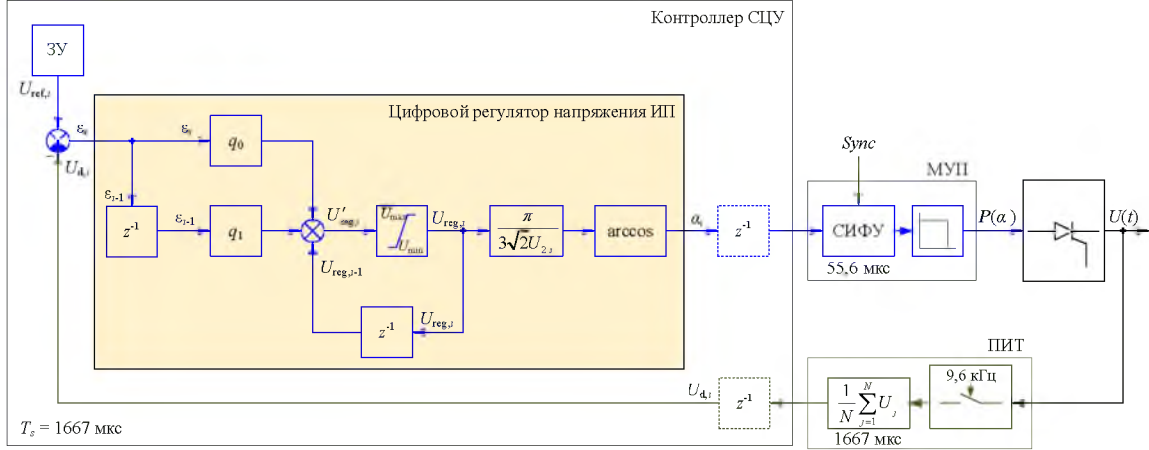


Рисунок 5 – Структурная схема СУ напряжением ИП токамака КТМ

Структура регулятора, представлена в рекуррентной форме, что позволяет вычислять выходную координату для  $i$ -го цикла управления, как:

$$U'_{\text{рег},i} = U_{\text{рег},i-1} + q_0 \varepsilon_i + q_1 \varepsilon_{i-1}, \quad (7)$$

где  $q_0$  и  $q_1$  – коэффициенты, определяющиеся циклом управления и параметрами настройки регулятора:

$$q_0 = k \left( 1 + \frac{T_s}{2T_{\text{и}}} \right), \quad q_1 = k \left( \frac{T_s}{2T_{\text{и}}} - 1 \right). \quad (8)$$

С использованием передаточной функции ТП вида:  $W_{\text{ИП}}(s) = \frac{e^{-T_{\text{ИП}}s}}{T_{\text{ИП}}s+1}$ , на основе критерия оптимального модуля рассчитаны первоначальные параметры настройки цифрового ПИ-регулятора напряжения:  $k_0 = 0,57143$ ,  $T_{\text{и},0} = 1,7707$  мс. С целью уточнения параметров настройки регулятора в среде Simulink/Simscapе проведен ряд экспериментов с использованием разработанной аналитической компьютерной модели ИП КТМ. По завершению экспериментов получены следующие значения:  $k \approx 0,3$ ,  $T_{\text{и}} \approx T_{\text{ИП}} = 1,667$  мс.

Окончательные параметры настройки регулятора, удовлетворяющие предъявленным требованиям по качеству регулирования, загружены в СЦУ при проведении комплексной наладки СИЭП с её включением на обмотки КТМ. На рисунке 6 в качестве примера представлены графики, отражающие результат сравнения экспериментальных данных и данных, полученных при моделировании для ИП СС. На приведенных графиках:  $U_{\text{ref}}$  – уставка напряжения,  $U_{\text{sim}}$  и  $U_{\text{exp}}$  – выходное напряжение ИП СС,  $\alpha_{\text{sim}}$  и  $\alpha_{\text{exp}}$  – угол управления,  $I_{\text{sim}}$  и  $I_{\text{exp}}$  – ток в обмотке СС, полученные в ходе моделирования и эксперимента соответственно.

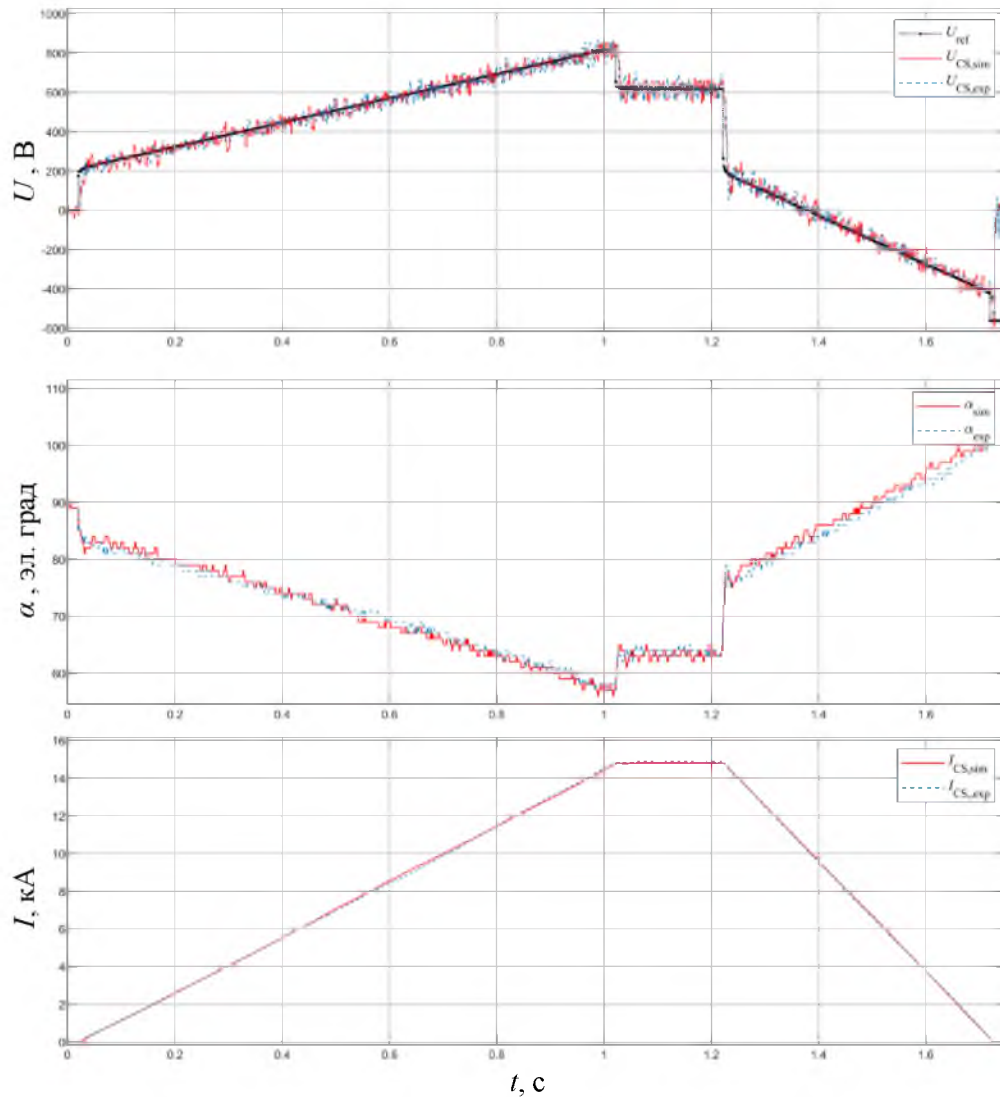


Рисунок 6 – Сравнение результатов моделирования ИП CS с экспериментальными данными

В целом можно констатировать хорошую корреляцию модельных и экспериментально полученных данных. На плато напряжения и тока в течении разряда разница в углах управления  $\alpha_{sim}$  и  $\alpha_{exp}$  составляет  $1^{\circ}$ – $3^{\circ}$ , что соответствует особенности асинхронно работающих цифровых устройств МУП, ПИТ, БСПС и др., в этой связи, различия в углах управления  $\alpha_{sim}$  и  $\alpha_{exp}$  до  $3^{\circ}$  при сопоставлении экспериментальных и модельных данных можно считать приемлемым. Данная неточность носит системный характер и довольно эффективно нивелируется реализованной СУ.

Учитывая существенную нелинейность статических и динамических характеристик ИП КТМ, в качестве основного показателя качества управления принята интегральная оценка точности воспроизведения сценария изменения средневыврямленного напряжения, рассчитанная с использованием соотношения:

$$\sigma_U = \frac{100\%}{2U_{d0}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_{ref}(t) - U_d(t))^2 dt}, \quad (9)$$

где:  $U_d$  – средневыврямленное напряжение ИП,  $U_{ref}$  – диаграмма изменения уставки напряжения,  $T$  – время разряда,  $U_{d0}$  – номинальное напряжение ИП. Показатель  $\sigma_U$

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  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ .

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

$$\sigma_I = \frac{100\%}{2I_0} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_{ref}(t) - I_d(t))^2 dt}, \quad (10)$$

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

Исходя из условий осуществимости и стабильности поддержания плазменного разряда для КТМ показатели  $\sigma_U$  и  $\sigma_I$  на этапе разряда не должны превышать 5 %. Значения  $\sigma_U$ , полученные в ходе наладочных работ на трех различных конструктивно и охватывающих требуемую номенклатуру ИП КТМ приведены в таблице 3.

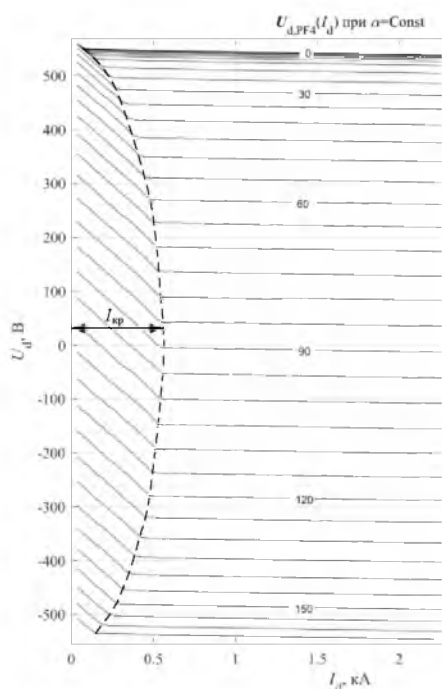


Рисунок 7 - Увеличенный фрагмент характеристики  $U_{d,PF4} = f(I_d)$  с областью докритического режима работы

Таблица 3 – Точность управления напряжением при наладке ИП КТМ

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

Поскольку модели ИП были признаны адекватными, это позволило использовать их для расчета внешней характеристики  $U_d(\alpha, I_d)$ , углов коммутации  $\gamma(\alpha, I_d)$  и определения границ режимов работы ИП КТМ. При помощи компьютерного моделирования для каждого типа ИП были построены соответствующие номограммы и выявлены все возможные режимы их работы. Анализ номограмм выявил существование докритического режима (рисунок 7) в области относительно малых токов в нагрузке ( $I_{кр} < \sim 600$  А) для всех ИП обмоток PF. Данный режим характерен для схем ИП с наличием уравнивающего реактора и, к сожалению, несколько ухудшает их управляемость в соответствующем диапазоне изменения угла

управления ( $\approx 90^\circ$ ) и тока в нагрузке.

Вместе с этим выявлено, что ИП обмоток PF1-PF3 и PF6 в пределах проектных параметров всегда будут работать в режиме № 1 ( $\gamma < 30^\circ$ ). ИП TF, PF4 и PF5 могут работать в режиме №1 и в режиме № 2 ( $\gamma < 30^\circ$  и  $\gamma = 30^\circ$ ). ИП обмотки CS может работать также и в режиме № 3 ( $\gamma > 30^\circ$ ). Внешняя характеристика ИП в режимах № 2 и 3 с ростом тока в нагрузке существенно ухудшается.



На рисунке 8 представлено фото нестандартного электротехнического оборудования, разработанного и внедренного в составе СИЭП КТМ по результатам наладки и электротехнических испытаний.



а) ТП, УР и магистральные шинопроводы источников питания



б) ключ-прерыватель источника питания обмотки СS

Рисунок 8 – Фото нестандартного электротехнического оборудования СИЭП КТМ

На основе разработанных моделей отдельных ИП реализована и верифицирована комплексная аналитическая Simulink/Simscape модель СИЭП токамака КТМ (рисунок 9).

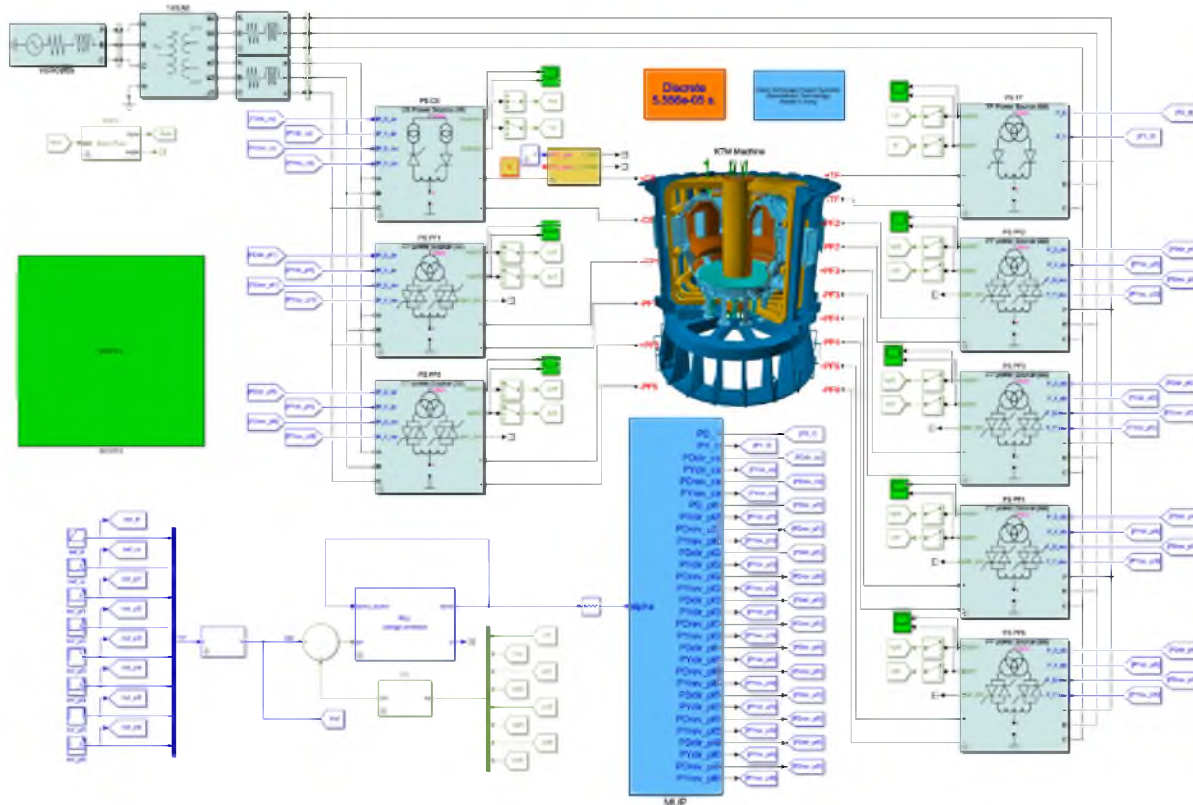


Рисунок 9 – Комплексная модель СИЭП КТМ совместно с её СЦУ

В целом данная модель позволяет:

- Моделировать требуемые сценарии разряда с различными входными данными, учитывая все необходимые особенности СИЭП КТМ;

– Оценивать физическую реализуемость сценариев, а также точность воспроизведения заданных диаграмм. Выявлять опасные сценарии, которые могут привести к аварийным ситуациям;

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

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

Завершающий этап физического пуска установки КТМ, успешно реализованный 20 ноября 2019 года, показал хорошую корреляцию модельных и экспериментально полученных данных. Интегральная оценка точности воспроизведения сценария изменения напряжения и тока в обмотках ЭМС для разряда № 3575, реализованного на физическом пуске КТМ, приведена в таблице 4. Таблица 4 – 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

В четвертой главе обоснована необходимость создания СПЗ электротехнического комплекса КТМ, как распределенной реактивной дискретно-событийной системы, описан состав и обозначены её границы. Данная система объединяет в себе все необходимые для ликвидации аварийных ситуаций исполнительные механизмы, датчики, контролирующие параметры работы оборудования, а также контроллеры и микропроцессорные устройства, непосредственно реализующие логику её работы. Система ограничена «сверху», со стороны сети 220 кВ элегазовым выключателем и его устройством управления, отключающим головной трансформатор 220/10 кВ (Т), «снизу» – обмотками ЭМС КТМ. Контроллер СПЗ реализует функцию централизации учёта и синхронизации выдачи управляющих команд (рисунок 2).

Аварии на системах электропитания токамаков должны устраняться по принципу минимизации ущерба, как от самой аварии, так и от последствия её ликвидации для основного технологического оборудования (срыв плазмы, перенапряжения на обмотках ЭМС при неконтролируемом отключении ИП и др.). Комплекс противоаварийных мер направляется на скорейшее и эффективное устранение аварии, приведение оборудования в безопасное состояние и сохранение ресурса электротехнического и коммутационного оборудования. Большое значение имеют момент возникновения аварии (до или в процессе разряда), её локализация и степень тяжести. Эти факторы определяют последовательность противоаварийных действий в зависимости от состояния системы электропитания и самой установки КТМ в каждый конкретный момент времени.

С учетом специфики работы токамака КТМ определены все возможные и детектируемые для его электротехнического комплекса типы аварий, а также оптимальные последовательности противоаварийных действий при их локализации. Поскольку любая дискретно-событийная система может быть описана абстрактным автоматом, представленным кортежем:  $A = (X, Y, S, f_y, f_s, S_0)$ , где:  $X$  – множество сигналов на входе,  $Y$  – множество сигналов на выходе,  $S$  – множество состояний,  $f_y$  – функция выходов,  $f_s$  – функция переходов,  $S_0$  – начальное состояние автомата в момент времени  $t = 0$  - задача формализации таких систем в основном решается применением аппарата дискретной математики.

В целях эффективной реализации противоаварийных действий соответствующие алгоритмы формализованы в виде автомата Мура (опережающего автомат Мили на один дискретный шаг времени), который описывается следующей парой уравнений:

$$\begin{aligned} s'(t+1) &= f'_s(x(t+1), s'(t)); \\ y(t) &= f'_y(s'(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

Внутренние и внешние переменные автомата соотнесены с входными и выходными сигналами СПЗ. В синтезированном автомате определены: возможных состояний ( $S_i \in S$ ) - 51, интегрированных входных переменных ( $X_i \in X$ ) – 133, выходных переменных ( $Y_i \in Y$ ) - 51. Характеристические функции  $f_y$  и  $f_s$  выражены табличным и графическим (рисунок 10) способами.

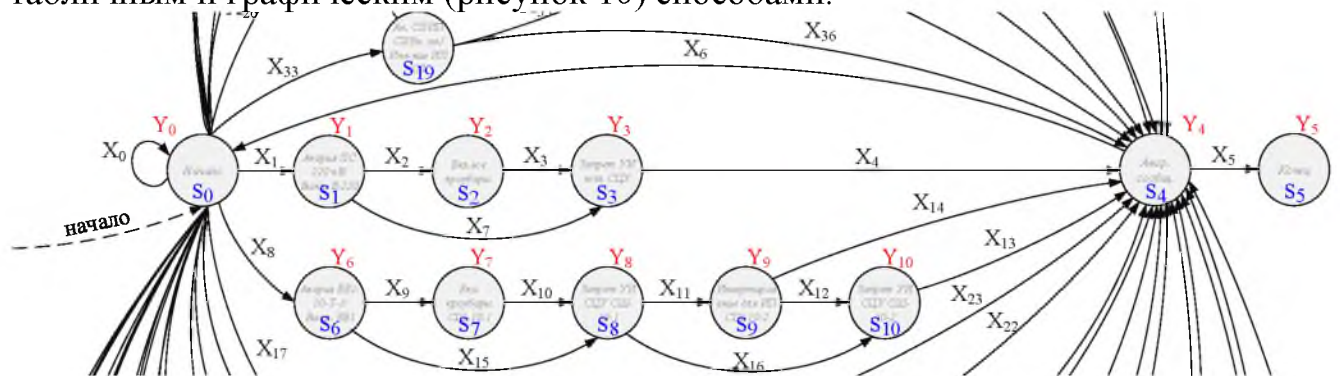


Рисунок 10 – Фрагмент орграфа синтезированного автомата Мура

В целях адекватного отображения параллельно происходящих в СПЗ процессов и учета их темпоральных зависимостей, на основе логики синтезированного автомата Мура осуществлено имитационное моделирование системы в программной среде CPN Tools, использующей математический аппарат временных раскрашенных сетей Петри (рисунок 11), что отличает примененный метод формализации алгоритмов и подход к моделированию СПЗ от известных.

Временные задержки прохождения сигналов в системе моделировались с использованием положений теории вероятностей, при этом использовалось нормальное распределение вероятностей, с функцией плотности вероятности:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (12)$$

где:  $\mu$  – математического ожидание,  $\sigma^2$  – дисперсия распределения.

А также равномерное распределение с функцией плотности вероятности на отрезке  $[a, b]$ , при  $a, b \in R$ :

$$f(x) = \frac{1}{b-a}, \text{ если } x \in [a, b]; f(x) = 0, \text{ если } x \notin [a, b] \quad (13)$$



Рисунок 11 – Фрагмент модели системы противоаварийной защиты в среде CPN Tools

В целях оптимизации и уменьшения пространства состояний модель реализована для двух источников питания (TF и CS), подключенных к двум независимым секциям шин 10 кВ. Это позволило верифицировать логику работы СПЗ для всех возможных и детектируемых типов аварий, а также провести статистический анализ времен реализации противоаварийных воздействий без потери качественных и количественных данных. Всего проанализировано 33 типа аварий (таблица 5). Для накопления статистических данных реализовано 297 опытов имитационного моделирования (по 33 аварии для девяти источников питания).

Таблица 5 – Моделируемые типы аварий

№	Тип аварии
1	Отключение ПС 220 кВ до начала разряда (ток в обмотках отсутствует)
2, 3	Отключение ПС 220 кВ после начала разряда (ток в обмотке CS / TF)
4	Авария выключателя РУ 10кВ СШ-1 до начала разряда
5, 6	Авария выключателя РУ 10кВ СШ-1 после начала разряда
7	Авария выключателя РУ 10кВ СШ-2 до начала разряда
8, 9	Авария выключателя РУ 10кВ СШ-2 после начала разряда
10	Отключение питания ИП CS до начала разряда
11, 12	Отключение питания ИП CS после начала разряда
13	Отключение питания ИП TF до начала разряда
14, 15	Отключение питания ИП TF после начала разряда
16	Авария на обмотке / преобразователях ИП CS до начала разряда
17, 18	Авария на обмотке / преобразователях ИП CS после начала разряда
19	Авария на обмотке / преобразователях ИП TF до начала разряда
20, 21	Авария на обмотке / преобразователях ИП TF после начала разряда
22	Отказ СЦУ ИП CS до начала разряда
23, 24	Отказ СЦУ ИП CS после начала разряда
25	Отказ СЦУ ИП TF до начала разряда
26, 27	Отказ СЦУ ИП TF после начала разряда
28	Превышение напряжения на обмотке CS (ток отсутствует в обмотке TF)
29	Превышение напряжения на обмотке CS (ток присутствует в обмотке TF)
30	Превышение напряжения на обмотке TF (ток отсутствует в обмотке CS)

31	Превышение напряжения на обмотке TF (ток присутствует в обмотке CS)
32, 33	Внешние аварии (в начальную разметку сети не загружаются) для ИП TF / CS

Выявлено, что логика выдачи сигналов противоаварийных воздействий в модели соблюдается для всех типов аварий и реализуется в соответствии с синтезированным ранее автоматом Мура. Для каждого типа аварии определены максимальное, минимальное и среднее значение времени реализации противоаварийного алгоритма. Аварии, в которых выявлены равнозначные значения генерируемых величин времени, а также с одинаковым набором противоаварийных действий объединены в соответствующие группы.

Анализ показал, что максимальное усредненное время реализации противоаварийного алгоритма, равное 141,1 мс наблюдается для аварии № 27, минимальное усредненное время, равное 2,1 мс наблюдается для аварии № 33. В соответствии с руководящими документами по релейной защите и автоматике в сетях с напряжением 110-220 кВ, в целях сохранения физической целостности оборудования и обеспечения устойчивости энергосистемы, локализация аварий должна происходить за временной интервал от 150 до 300 мс. Таким образом, полученные в модели временные задержки реализации противоаварийных действий не превышают нижний порог лимита по локализации аварий в самом требуемом сегменте сетей электротехнического комплекса КТМ — сегменте сети с напряжением 220 кВ.

По завершению наладки СПЗ КТМ проведены замеры времен прохождения сигналов и реализации противоаварийных действий для всех групп аварий с максимальным усреднённым временем реализации противоаварийного алгоритма (аварии № 2, 3, 6, 8, 11, 15, 16, 17, 18, 23, 27, 28 и 29). Рисунок 12 отображает соответствие модельных и экспериментально полученных данных.

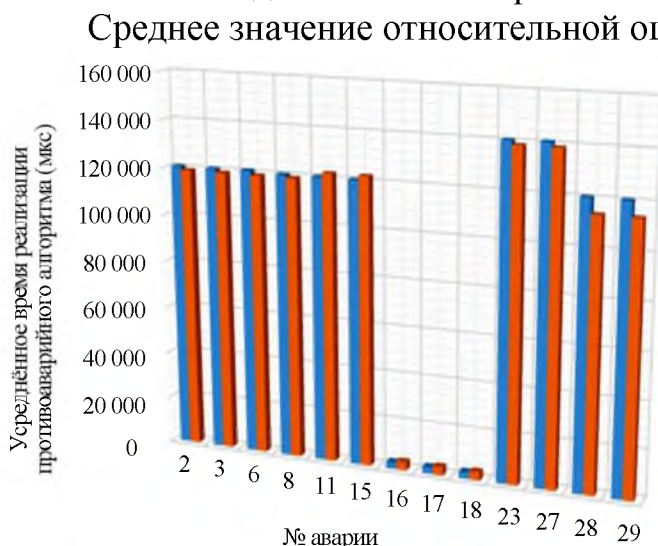


Рисунок 12 - Соответствие модельных и экспериментально полученных данных: ■ — время по модели; ■ — измеренное время

как 
$$\delta T_i = \left| \frac{x_i - x_i'}{x_i} \right| \times 100\% \quad (\text{где } x_i \text{ —}$$

экспериментальное время реализации противоаварийного алгоритма,  $x_i'$  — модельное время) составило 6%, что говорит о довольно хорошей корреляции модельных и экспериментально полученных данных и позволяет судить об адекватности и применимости используемого подхода при решении схожих задач в других областях науки и отраслях промышленности.

Проведенные исследования позволили внедрить имитационную компьютерную модель и предложенные алгоритмы противоаварийной защиты в СПЗ энергокомплекса КТМ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 исходные данные, накладывающие требования к СИЭП КТМ как к исполнительному механизму СУП. 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. 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 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 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 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. Доказана 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, что доказывает адекватность и применимость предложенного подхода при решении схожих задач в других областях науки и отраслях промышленности.

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 достигнута. Полученные результаты позволят расширить схемотехническую базу СИЭП сверхмощных электрофизических установок, базу математического и информационного обеспечения их СУ, а также комплекс решений, используемых при аналитическом и имитационном моделировании технологических процессов, соответствующих СУ и СПЗ.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в реферативных базах Scopus и Web of Science**

1. The Electrotechnical Complex of the KTM Tokamak Pulsed Power Supply System / D.B. Zarva, A.A. Deriglazov, E.G. Batyrbekov, I.L. Tazhibayeva, V.M. Pavlov et al. // *Physics of Atomic Nuclei*, 2019, Vol. 82, No. 7, pp. 1038–1047. *Электротехнический комплекс системы импульсного электропитания токамака КТМ / Д.Б. Зарва, А.А. Дериглазов, Э.Г. Батырбеков, И.Л. Тажибайева, В.М. Павлов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. – 2018. – Т. 41, № 2. – С. 59–70. Индексируется в Web of Science и Scopus.*

2. EMERGENCY PROTECTION SYSTEM OF ELECTROTECHNICAL TOKAMAK KTM COMPLEX. ALGORITHMIC AND INFORMATION SUPPORT / D.B. Zarva, A.A. Deriglazov, E.G. Batyrbekov, I.L. Tazhibayeva, V.M. Pavlov et al. // *Problems of Atomic Science and Technology, Ser. Thermonuclear Fusion*, 2019, Vol. 42, No 1, pp. 74–88. **Индексируется в Scopus.**

3. 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. **Журнал, рекомендованный ВАК РФ.**

4. Котов С.В. О создании системы управления вертикальным положением плазмы в Токамаке КТМ / С.В. Котов, В.М. Павлов, Д.Б. Зарва // *Вестник МЭИ*. – 2021. – Т. 1, № 1. – С. 32–38. **Журнал, рекомендованный ВАК РФ.**

**В рецензируемых зарубежных изданиях, индексируемых в Scopus**

5. Study of breakdown and plasma formation in the KTM tokamak with the massive conductive vacuum chamber / B. Chektybayev, A. Sadykov, E. Batyrbekov, M. Skakov, D. Zarva et al. // *Fusion Engineering and Design*, 2020, Vol. 163, Article Number 112167, pp. 1–11.

### **Доклады на конференциях**

6. Tokamak KTM. The power supply system / B. Polyakov, V. Minkov, V. Raspopin, D. Zarva // *Proc. of the International workshop «19-th IAEA Technical meeting on research using small fusion devices»*. – Kurchatov (Kazakhstan). – 2009. – P. 69.

7. Матаннанов И.И. Разработка модели источника импульсного электропитания центрального соленоида токамака КТМ / И.И. Матаннанов, Д.Б. Зарва, В.М. Павлов // *Тезисы докладов международной научно-практической*

конференции «Физико-технические проблемы в науке и промышленности». – Томск (Россия). – 2015. – С. 322–323.

8. Kazakhstani material testing tokamak KTM. Project status / E.G. Batyrbekov; M.K. Skakov; I.L. Tazhibayeva; A.A. Kolodeshnikov; G.V. Shapovalov; D.B. Zarva // Proc. of the 21st International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion. – Astana (Kazakhstan). – 2016. – P. 12.

9. Fusion activities in republic of Kazakhstan / I.L. Tazhibayeva, E.G. Batyrbekov, M.K. Skakov, G.V. Shapovalov, D.B. Zarva et al. // Proc. of the IV Inter. Sci. and Tech. Conf. «Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power». – Moscow (RF). – 2016. – Vol. 2. – P. 208–218.

10. Система импульсного электропитания казахстанского материаловедческого токамака КТМ / Д.Б. Зарва, А.А. Дериглазов, В.М. Павлов, Э.Г. Батырбеков // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва (РФ). – 2018. – С. 1108.

11. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и международное сотрудничество в области управляемого термоядерного синтеза / И.Л. Тажибаева, Э.Г. Батырбеков, М.К. Скаков, Д.Б. Зарва и др. // Сборник докладов международной научно-технической конференции НИКИЭТ «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетика». – Москва (РФ). – 2018. – С. 127–138.

12. Организация сети реального времени для передачи уставок в систему цифрового управления источниками питания токамака КТМ / А.А. Дериглазов, С.В. Федин, Д.Б. Зарва, Ю.Н. Голобоков // Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине». – Томск (РФ). – 2019. – С. 217.

13. Котов С.В. Создание системы управления вертикальным положением плазмы токамака КТМ / С.В. Котов, Д.Б. Зарва, В.М. Павлов // Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине». – Томск (РФ). – 2019. – С. 228.

14. Система цифрового управления силовыми полупроводниковыми преобразователями распределенной энергетической сети импульсного электропитания токамака КТМ / А.М. Ли, Д.Б. Зарва, С.В. Котов, В.М. Павлов Павлов // Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине». – Томск (РФ). – 2019. – С. 229.

#### **Прочие публикации**

15. О проекте создания казахстанского материаловедческого токамака КТМ / Д.Б. Зарва, Э.Г. Батырбеков, М.К. Скаков, И.Л. Тажибаева, В.М. Павлов // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – Т. 4. – С. 66–69.

#### **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ**

1. Ли А.М., Павлов В.М., Федин С.В., Зарва Д.Б., Дериглазов А.А. «Tokamak\_Power\_Control» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619933.