

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

**Școala doctorală „Știința Calculatoarelor, Electronică și Energetică”
Departamentul „Electroenergetică și Electrotehnică”**

Cu titlu de manuscris

C.Z.U:621.314(043)

GOLUB IRINA

**UTILIZAREA CONVERTOARELOR COMANDATE DE
PUTERE PENTRU DIRIJAREA CU REGIMUL SISTEMULUI
ELECTROENERGETIC**

221.01. SISTEME ȘI TEHNOLOGII ENERGETICE

Teză de doctor în științe inginerești

CHIȘINĂU, 2021

ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ МОЛДОВЫ

**Докторальная школа „Компьютерные науки,
электроника и энергетика”
Департамент «Электроэнергетика и Электротехника»**

На правах рукописи

У.Д.К.: 621.314(043)

ГОЛУБ ИРИНА

**ПРИМЕНЕНИЕ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ
УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ
221.01 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

КИШИНЕВ, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИИ	6
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	9
ВВЕДЕНИЕ	10
1. ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА КАК ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ	21
1.1. Общие положения	21
1.1.1. Структурная схема и специфика фазорегулирующих устройств	21
1.1.2. Способы регулирования фазового сдвига	23
1.1.3. Типовые конфигурации ФРТ	24
1.1.4. Средства управления ФРТ	27
1.1.5. Функции, реализуемые ФРТ в энергосистеме	29
1.2. Опыт разработки и внедрения фазорегулирующих трансформаторов	30
1.2.1. Ведущие производители ФРТ	30
1.2.2. Фазоповоротные трансформаторы в Европе	33
1.2.3. Фазоповоротные трансформаторы: применение в Америке	36
1.2.4. Фазоповоротные трансформаторы: применение в Азии	38
1.3. Выводы по первой главе	39
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ	40
2.1. Методология исследования трансформаторных фазорегулирующих устройств	40
2.1.1. Цели моделирования и основные свойства моделей	40
2.1.2. Математическое моделирование	41
2.1.3. Структурно-имитационное моделирование	41
2.1.4. Физическое моделирование	44
2.2. Моделирование фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме "звезда"	46
2.2.1. Схема и описание устройства	46
2.2.2. Математическая модель устройства	47
2.2.3. Определение технических характеристик устройства на основе применения структурно-имитационной модели	53
2.3. Исследование характеристик "однотрансформаторного фазорегулирующего устройства с регулированием в нейтрали"	54
2.3.1. Схема и описание фазорегулирующего трансформатора	54
2.3.2. Математическая модель устройства	55
2.3.3. Модифицированная система управления устройством	59
2.3.4. Определение технических характеристик устройства на основе применения структурно-имитационного моделирования	60
2.4. Фазорегулирующее устройство, выполненное по схеме "треугольник"	61
2.4.1. Общая характеристика объекта исследования	61
2.4.2. Основные уравнения параметров режима.	62
2.4.3. Определение технических характеристик устройства на основе применения структурно-имитационного моделирования	65
2.5. Выводы по второй главе	66
3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИЧЕСКИХ ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ	68

3.1. Схемы регулирования угла фазового сдвига и законы управления силовыми ключами	68
3.2. Исследование характеристик фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме "модифицированный треугольник"	70
3.3. Исследование характеристик фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме "инвертированный многоугольник"	75
3.4. Исследование фазорегулирующего устройства, выполненного на основе схемы "модифицированный многоугольник"	78
3.5. Исследование характеристик фазорегулирующего устройства, реализованного в "гексагональной" конфигурации	82
3.6. Сравнительный анализ энергетических характеристик различных схемных вариантов ФРТ	86
3.7. Выводы к третьей главе	89
4. ПРИМЕНЕНИЕ ФРТ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТА КОМБИНИРОВАННЫХ FACTS	90
4.1. Статический частотный преобразователь на основе ФРТ	90
4.1.1. FACTS для объединения энергосистем с различными стандартами рабочей частоты	90
4.1.2. Условия проведения экспериментов	91
4.1.3. Одноканальный преобразователь частоты	92
4.1.4. Двухканальный преобразователь частоты	95
4.2. Индуктивные элементы (дрессели) как средство повышения качества преобразования	100
4.2.1. Постановка задачи и условия моделирования	100
4.2.2. Схемные варианты частотного преобразователя	101
4.2.3. Результаты моделирования	101
4.3. Источник реактивной мощности, управляемый ФРТ	104
4.4. Выводы к четвертой главе	107
5. ЛАБОРАТОРНЫЙ ОБРАЗЕЦ ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА	109
5.1. Параметры и характеристики лабораторного образца	109
5.1.1. Структурно-имитационная модель лабораторного образца	109
5.1.2. Уточнение параметров и характеристик лабораторного образца	114
5.1.3. Тестирование элементов устройства в режимах холостого хода и короткого замыкания	114
5.2. Компоненты (модули) лабораторного образца	117
5.2.1. Изготовление и испытания силового модуля	117
5.2.2. Модернизация электронного блока коммутации и стратегии управления.	120
5.2.3. Разработка блоков управления	122
5.3. Комплексные испытания лабораторной установки	124
5.3.1. Общий вид установки	124
5.3.2. Испытание установки на активную нагрузку	125
5.3.3. Испытание установки на активную нагрузку с использованием шунтирующего конденсатора емкостью 90 мкф	127
5.4. Выводы по пятой главе	129
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ	131
БИБЛИОГРАФИЯ	134
ПРИЛОЖЕНИЯ	149

Приложение 1. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме "звезда"	149
Приложение 2. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме "однотрансформаторный с регулированием в нейтрали"	154
Приложение 3. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме "треугольник"	158
Приложение 4. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме «модифицированный треугольник»	164
Приложение 5. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме "инвертированный многоугольник"	173
Приложение 6. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме "модифицированный многоугольник"	179
Приложение 7. Режимные параметры ФРТ, выполненного в гексагональной конфигурации	185
ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ	189
ОБ АВТОРЕ	190

ADNOTARE

Autor - Golub Irina. Titlul: "**Utilizarea convertizoarelor de putere pentru controlul regimurilor de funcționare a sistemului energetic**". Teza de doctor în vederea conferirii titlului științific de doctor în științe tehnice în domeniul științelor tehnice la specialitatea 221.01 Sisteme și tehnologii energetice, Chisinau 2020.

Structura lucrării: lucrarea conține o introducere, cinci capitole, concluzii generale, bibliografie din 168 de surse și include 7 anexe, 190 pagini de text, 15 tabele și 117 de figuri. Rezultatele obținute sunt publicate în 18 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: transformator cu reglare a diferenței de fază, modelare matematică, modelare structurală de simulare, strategie de control, caracteristici energetice, FACTS combinat, mostră de laborator.

Domeniul de studiu: științe tehnice

Scopul tezei: Elaborarea controlerelor FACTS cu control de fază și cercetarea caracteristicilor lor de funcționare aplicând mijloace de modelare matematică, modelare structurală de simulare și modelare fizică, precum și aprobare de soluții care ameliorează caracteristicile tehnice ale obiectelor de cercetare.

Obiectivele tezei: Elaborarea variantelor de scheme ale controlerelor FACTS cu control de fază bazat pe mijloacele electronicii de putere și studiul acestora pe baza modelelor matematice, structurale de simulare și fizice în scopul aprobării deciziilor luate și optimizării parametrilor tehnici și constructive ale instalațiilor.

Noutatea științifică a tezei: constă în elaborarea cercetării și optimizării parametrilor variantelor de scheme ale controlerelor FACTS cu control de fază.

Problema științifică soluționată: constă în identificarea și optimizarea caracteristicilor tehnice și constructive ale FACTS controlerelor cu control de fază, care permit sporirea eficienței, flexibilității și fiabilității funcționării sistemelor energetice interconectate în contextul implementării SMART GRID.

Semnificația teoretică: rezultatele lucrării pot servi drept stimulent pentru cercetarea teoretică în domeniul elaborării, creării și aplicării controlerelor FACTS combinate, comandate de mijloacele electronicii de putere, ca bază pentru rețelele inteligente de adaptare activă moderne SMART GRID.

Valoarea aplicativă a lucrării: Materialele investigațiilor pot servi drept bază pentru elaborarea și proiectarea instrumentelor de gestionare a regimurilor interconexiunilor sistemelor energetice (interstatale) pentru soluționarea problemelor diversificării aprovizionării cu energie electrică și liberalizării pieței energiei în Republica Moldova

АННОТАЦИЯ

Автор – Голуб Ирина. Название: "**Применение силовых преобразователей для управления режимами работы энергосистемы**". Диссертация о присвоение докторской степени в области технических наук, специальность 221.01. Энергетические системы и технологии. Кишинэу 2020.

Структура работы: работа состоит из: введения; пяти глав; выводов; библиографии, содержащей 168 источников и включает 7 приложений; 190 страниц основного текста; 15 таблиц и 117 рисунков. По результатам исследований опубликовано 18 научных работ.

Ключевые слова: фазорегулирующий трансформатор, математическое моделирование, структурно-имитационное моделирование, стратегия управления, энергетические характеристики, комбинированный FACTS, лабораторный образец.

Область исследования: технические науки.

Цель диссертации: Разработка FACTS-контроллеров с фазовым управлением и исследование их режимных характеристик с использованием средств математического, структурно-имитационного и физического моделирования, а также апробация решений, обеспечивающих улучшение технических характеристик объектов исследования.

Задачи диссертации: Разработка схемных вариантов FACTS контроллеров с фазовым управлением на основе средств силовой электроники и их исследование на основе математических, структурно-имитационных и физических моделей с целью апробации принятых решений и оптимизации конструктивных и технических параметров устройств.

Научная новизна работы: заключается в разработке исследовании и оптимизации параметров схемных вариантов FACTS контроллеров с фазовым управлением.

Решенная научная проблема: состоит в определении и оптимизации конструктивных и технических характеристик FACTS контроллеров с фазовым управлением, позволяющих повысить эффективность, гибкость и надежность работы объединенных энергосистем в контексте внедрения SMART GRID.

Теоретическая значимость. Результаты работы могут сыграть роль стимула для теоретических исследований в сфере разработки, создания и применения FACTS контроллеров, управляемых средствами силовой электроники, в качестве основы интеллектуальных активно-адаптивных сетей.

Прикладное значение работы: Материалы исследования могут послужить основой для разработки и проектирования средств управления режимами межсистемных (межгосударственных) связей для решения задач диверсификации поставок электроэнергии и либерализации энергорынка в Республике Молдова.

ABSTRACT

The author is Irina Golub. The title is ‘**The Use of the Power Transformers for the Regulation of the Power System Operation**’. Dissertation for awarding the doctor-degree in the region of technical sciences, speciality 221.01. Power systems and technologies. Chisinau, 2020.

Structure of the work: the dissertation includes introduction; five chapters; conclusions; references, which contain 168 sources and 7 appendices; there are 190 pages of the main text; 15 tables and 117 figures; 18 scientific works are published based on the research results.

Keywords: phase-shifting transformer, mathematic modeling, structural-simulation modeling, strategy of control, power characteristics, combined FACTS, laboratory sample

Region of study: technical sciences.

Target of dissertation: The development of FACTS-controllers based on the phase regulation and study of their mode characteristics using means of mathematic and structural-simulation modeling, as well as the approbation of solutions that ensure improvement of the technical characteristics of the objectives under consideration.

Dissertation tasks: Creation of schematic variants of the FACTS-controllers under the phase control based on the power electronics and their study on the basis of mathematic, structural-simulation and physical models for the purpose of approbation of the decisions taken and optimization of the constructive and technical parameters of the devices.

Scientific novelty of the work: consists in the development of the research and optimization of the parameters of the FACTS-controllers schematic variants with a phase regulation.

Scientific problem solved: consists in determination and optimization of constructive and technical characteristics of the FACTS-controllers based on the phase control, which allow the efficiency, flexibility and reliability of the work of the joined power systems to be improved in the context of introduction into the SMART GRID.

Theoretic importance: The results of the work can be a stimulus for the theoretic investigations in the sphere of development, creation and application of the FACTS-controllers regulated by means of the power electronics as a basis for the intellectual actively-adaptive networks.

Application relevance of the work: Materials of the work can serve as a basis for the development and design of the means of control for the modes of intersystem (interstate) connections to solve problems of diversification of the electric energy supplies and liberalization of the energy market in Moldova Republic.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

FACTS	Flexible Alternative Current Transmission Systems
СТК	Статический Компенсатор Реактивной Мощности
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor или Биполярный Транзистор с Изолированным Затвором
IGCT	integrated gate-commutated thyristor
СТАТКОМ	Синхронный статический компенсатор
ССПК	Синхронный статический продольный компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения
ОРПМ	Объединённый Регулятор Потокв Мощности
ВПТ	Вставка Постоянного Тока
ФПУ	Фазоповоротный трансформатор
АСК	Асинхронизированный Синхронный Компенсатор
ФРТ	Фазорегулирующий трансформатор
АС ЭМПЧ	Асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты
РПН	Регулирование под нагрузкой
ПБВ	Переключение без возбуждения
КЗ	Короткое замыкание
ВЛ	Воздушная Линия
ЭЭС	Электроэнергетические системы
IPC	Interphase Power Controller
ЛЭП	Линия электропередач
SPS	SimPowerSystems
HVDC	A High-Voltage, Direct Current
VFT	Voltage Frequency Transformer
THD	Total Harmonic Distortion
ИРМ	Источник реактивной мощности
КПД	Коэффициент полезного действия
УПКФРТ	Продольная компенсация, управляемая фазорегулирующим трансформатором

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире роль электричества и электроэнергии в целом огромна. Электричество сопровождает человека повсюду. Существование человечества сегодня невозможно представить без потребления энергии. Удовлетворение потребностей, улучшение условий жизни, увеличение ее продолжительности - все это требует доступной энергии. За последнее время рост потребления энергии стал особенно стремительным, индустриальная эпоха внесла в это свой вклад. В современном мире энергетика является основой развития базовых отраслей промышленности, определяющих прогресс общественного производства. Во всех промышленно развитых странах темпы развития энергетики опережают темпы развития других отраслей [78,84,93,113] .

Современное состояние мировой энергетики характеризуется следующими тенденциями:

- продолжающимся ростом нагрузок, определяемым развитием экономики страны;
- большой плотностью электрических сетей различных классов напряжения;
- повышенными экологическими требованиями к объектам электроэнергетики, что вызывает определенные сложности в сооружении новых линий электропередач;
- формированием объединенных энергосистем;
- внедрением рыночных отношений в электроэнергетике, что вызывает не всегда предусмотренный диспетчерским графиком обмен мощностью и энергией между отдельными энергетическими компаниями, электроэнергетическими системами и крупными регионами;
- стремлением использовать наиболее дешевые источники электроэнергии, расположенные, как правило, в отдаленных районах;
- крупными авариями, возникающими обычно из-за слабости отдельных межсистемных связей и приводящими к обесточиванию крупных регионов.
- неэкономичное распределение нагрузки между сетями более высокого номинального напряжения и низкого, слабость некоторых межсистемных связей, изменение потоков мощности в соответствии с требованиями энергорынка [78,85].

Большинство из вышеперечисленных направлений присуще и энергетическому комплексу Молдовы. Очевидно, что для решения современных проблем энергетического комплекса необходимо повышать управляемость системы, что ведет к разработке концепций и средств управления на различных уровнях иерархии. Таким образом,

вопросы повышения управляемости электрических сетей за счет применения специальных технических средств в настоящее время весьма актуальны.

Эти средства должны обеспечить решение следующих задач:

- повышение пропускной способности отдельных линий или сети в целом;
- управление потоками активной и реактивной мощности по отдельным связям или сечениям сети, что позволяет снизить потери, обеспечить требования по балансу реактивной мощности и уровню напряжения в узлах, повысить статическую устойчивость системы;
- осуществление симметрирования параметров сети в различных режимах, а также ограничение токов короткого замыкания;
- повышение надежности работы системы за счет применения быстродействующих устройств управляемых средствами силовой электроники.

Для решения вопросов повышения степени управляемости в настоящее время в мире предлагается так называемая концепция интеллектуальных сетей (SMART GRID), которая является частью энергетических программ ведущих стран [70,31,116,96,97].

Энергосистемы с интеллектуальными свойствами при передаче электроэнергии от производителя к потребителю являются современным направлением в развитии электроэнергетики [141]. Используя современные информационные и коммуникационные технологии, всё оборудование сетей SMART GRID взаимодействует друг с другом, образуя единую интеллектуальную систему энергоснабжения. Внедрение концепции SMART GRID на уровне государства рассматривается как идеологическая основа национальных программ развития электроэнергетики. Компании-производители оборудования оценивают это направление в первую очередь с точки зрения открывающихся возможностей для создания и развития нового бизнеса на основе внедрения в энергосистемах инновационного энергетического оборудования [146, 150]. Энергетические компании, считают SMART GRID базой, которая обеспечит их устойчивое развитие и приток инновационных технологий.

Таким образом, SMART GRID — это совокупность подключённых к генерирующим источникам и потребителям «интеллектуальных» устройств — линий электропередачи, преобразователей электроэнергии, коммутационных аппаратов, устройств защиты и автоматики, современных информационно-технологических и управляющих систем, источников генерации, в том числе использующих возобновляемую

энергию, — снабженная системой мониторинга и автоматического управления распределёнными техническими средствами [101].

К основным признакам и требованиям SMART GRID можно отнести [96]..

- способность к самовосстановлению после сбоев в подаче электроэнергии;
- возможность активного участия в работе сети потребителей;
- устойчивость сети к физическому и кибернетическому вмешательству злоумышленников;
- обеспечение требуемого качества передаваемой электроэнергии;
- обеспечение синхронной работы источников генерации;
- повышение эффективности работы энергосистемы в целом.
- насыщенность сети активными элементами, позволяющими изменять топологические параметры сети;
- наличие большого количества датчиков, измеряющих текущие режимные параметры для оценки состояния сети в различных режимах работы энергосистемы;
- наличие системы сбора и обработки данных (программно-аппаратные комплексы), а также средств управления активными элементами сети и электроустановками потребителей;
- наличие необходимых исполнительных органов и механизмов, позволяющих в режиме реального времени изменять топологические параметры сети, а также взаимодействовать со смежными энергетическими объектами;
- наличие средств автоматической оценки текущей ситуации и построения прогнозов работы сети;
- высокое быстродействие управляющей системы и информационного обмена.

Следует отметить, что информационные системы – это надстройка, превращающая обычные электросети в SMART GRID, но в базе у SMART GRID находится сетевое оборудование способное реально управлять режимами сетей и потоками энергии. Таким образом, силовые управляемые устройства FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) активно-адаптивных сетей играют решающую роль в реализации этой технологии на практике [167].

Суть FACTS технологий состоит в том, что электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей [65,73,167].

Благодаря FACTS удается:

- управлять значением пропускной способности линии электропередачи;
- перераспределять между параллельными линиями электропередачи потоки активной мощности;
- оптимизировать их в установившихся режимах;
- перенаправлять их по сохранившимся после аварий линиям электропередачи, тем самым обеспечивая повышение надежности электроснабжения потребителей;
- FACTS являются альтернативой сооружению дополнительных линий электропередач при выполнении заданных требований по надёжности;
- ограничение токов короткого замыкания, основанное на применении технологии FACTS

Применение FACTS позволяет повысить пропускную способность линий (по некоторым оценкам – до 20%), обеспечить устойчивую работу энергетических систем, обеспечить заданные диспетчером параметры сети, что предотвращает потери электрической энергии (до 40%)[122]. FACTS, благодаря высокому быстродействию силовой электроники, способны воздействовать на происходящие в электроэнергетических системах процессы в режиме on-line, благодаря чему электропередачи превращаются из пассивных средств транспорта электрической энергии в активные устройства управления режимами работы [137].

Все устройства FACTS можно условно разделить на два поколения [4,27].

К устройствам FACTS первого поколения (FACTS-1) относят устройства, обеспечивающие регулирование напряжения (реактивной мощности) и обеспечивающие требуемую степень компенсации реактивной мощности в электрических сетях (статический компенсатор реактивной мощности (СТК), реактор с тиристорным управлением, стационарный последовательный конденсатор с тиристорным управлением, фазосдвигающий трансформатор и др.) [79].

К FACTS второго поколения (FACTS-2) относят устройства, обеспечивающие регулирование режимных параметров на базе полностью управляемых приборов силовой электроники (IGBT транзисторы, IGCT- тиристоры и др.). FACTS-2 обладают новым качеством регулирования - векторным, когда регулируется не только величина, но и фаза вектора напряжения электрической сети (синхронный статический компенсатор (СТАТКОМ), синхронный статический продольный компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения (ССПК), объединённый регулятор потоков мощности (ОРПМ), ВПН, ФПУ, асинхронизированный синхронный компенсатор в том числе с

маховиком (АСК), асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты (АС ЭМПЧ), фазорегулирующий трансформатор (ФРТ) [27,87,163,29].

Задачи обеспечения эффективного управления установившимися и переходными режимами электроэнергетических систем могут быть решены различными FACTS-контроллерами, одним из которых является ФРТ [44].

Фазорегулирующий трансформатор является одним из перспективных вариантов реализации управляемых линий электропередач [3,23,24,41]. ФРТ создаёт фазовый сдвиг между напряжением первичных шин и напряжениями вторичных шин путём ввода поперечного вольтодобавочного напряжения в месте установки, что позволяет управлять потоками мощности в линиях переменного тока. В современной мировой практике ФРТ широко применяются во многих энергосистемах, но все они построены на основе механических переключателей. Применение приборов силовой электроники в ФРТ позволит повысить надежность и срок службы высоковольтного коммутатора в составе ФРТ, многократно увеличит быстродействие, что ведёт к возможности управления переходными процессами, повышению устойчивости и как следствие обеспечению надежности энергоснабжения потребителей.

Актуальность и значимость

В условиях либерализации и реформирования электроэнергетики в энергосистемах различных государств, возрастают требования к повышению управляемости электрических сетей. В связи с этим при построении электрических сетей начинают все более широко применяться устройства FACTS и, в частности, ФРТ [4,167].

Фазорегулирующие трансформаторы, управляемые средствами силовой электроники являются на современном этапе одним из основных элементов объединенных энергосистем, позволяющих реализовать SMART GRID технологии [11].

Фазорегулирующие трансформаторы, находят как самостоятельное применение (например, управление потоками мощности в замкнутых неоднородных электрических сетях), так и могут являться составным элементом новых комбинированных FACTS-контроллеров, созданных на их основе [7].

Задача разработки и исследования новых технических решений в этой области является актуальной и значимой как с точки зрения оптимизации параметров ФРТ, так и для повышения эффективности, гибкости и надежности работы современных электроэнергетических систем.

Основные цели исследования

- Анализ тенденции развития средств управления режимными параметрами энергосистем.
- Разработка схемных вариантов ФРТ и исследование их режимных параметров на основе средств математического и структурно-имитационного моделирования.
- Разработка средств и алгоритмов управления углом фазового сдвига ФРТ.
- Исследование и анализ способов снижения типовой мощности трансформаторных устройств.
- Сравнительный анализ энергетических характеристик объектов исследования.
- Разработка и исследование новых комбинированных FACTS-контроллеров на основе ФРТ в качестве управляющего элемента.
- Разработка технических решений, обеспечивающих улучшение качества преобразования по частоте и передаваемой мощности.
- Разработка, изготовление и испытания физической модели ФРТ
- Разработка научно-обоснованных по применению предлагаемых устройств в энергосистеме.

Научная новизна представленной работы заключается в разработке и исследовании семи вариантов фазорегулирующих трансформаторов ранее нигде не описанных, по одному из которых получен Патент.

Для каждого из рассмотренных вариантов построены структурно-имитационные модели, позволившие провести серии виртуальных экспериментов и исследовать объекты в различных режимах (подтверждено 7 публикациями). По трем из представленных схемных вариантов разработаны оригинальные математические модели.

Разработаны и исследованы оригинальные схемы новых FACTS контроллеров, на основе ФРТ. Был предложен и исследован частотный преобразователь на основе схемы треугольника, в одно и двухканальном исполнении в различных модификациях. Теоретически доказана возможность качественного преобразования частоты и передачи активной мощности между энергосистемами с различными стандартами по поддержанию частоты. На базе схемы многоугольника было предложено управляемое компенсирующее устройство с широким диапазоном регулирования реактивной мощности, как в емкостном, так и индуктивном диапазоне (подтверждено 8 публикациями)

Предложены новые способы секционирования обмоток ФРТ, обеспечивающие различную дискретность регулирования угла фазового сдвига.

Предложены и исследованы способы улучшения качества передачи мощности в процессе частотного преобразования (применение двухканальной схемы, использование дополнительных индуктивных элементов, корректировка стратегии управления (безреверсный вариант)).

На базе гексагональной конфигурации ФРТ, была разработана архитектура физической лабораторной модели, предложены и реализованы оригинальные технические решения: при изготовлении модулей: силового, коммутационного, управления и синхронизации.

Теоретическая и практическая ценность результатов работы

Теоретическая ценность исследования заключается в разработке семи новых схемных вариантов фазорегулирующих трансформаторов и двух FACTS, выполненных на их основе, для каждого из которых построены и протестированы математические, структурно-имитационные и физические модели. Расчетные и натурные эксперименты подтвердили корректность используемых методов и моделей.

Полученные результаты исследования, пополняют базу отраслевых теоретических знаний, что позитивно повлияет на темпы продвижения практических инноваций в области повышения управляемости электроэнергетических систем. Результаты работы развивают теоретические знания в сфере разработки, создания и применения новых типов FACTS - контроллеров, управляемых средствами силовой электроники, в качестве основы интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей.

Результаты исследования также являются основой для разработки и проектирования технических средств управления режимами межсистемных связей для решения задач диверсификации поставок электроэнергии и либерализации энергорынка в Республике Молдова.

Методология и методы исследования

Для построения рабочих моделей объектов исследования, получения и обработки результатов расчетных экспериментов использовались методы математического, структурного, имитационного и физического моделирования, а также такие методы исследования, как измерение, сравнение, анализ и синтез. В качестве основы моделирования были использованы современные компьютерные технологии.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Схемные варианты ФРТ, позволившие существенно уменьшить установленную (типовую) мощность по сравнению с классическими схемами их реализации.
2. Способы секционирования обмоток управления и законы коммутации средств силовой электроники для реализации требуемых стратегий регулирования угла фазового сдвига ФРТ.
3. Математические, структурно-имитационные и физические модели ФРТ для исследования процессов при управлении коммутаторами на основе разработанных стратегий управления.
4. Схемные варианты FACTS - контроллеров, позволяющих осуществить регулируемую связь энергосистем с различными стандартами частоты управляемые ФРТ.
5. Методы улучшения качества передачи электроэнергии в процессе частотного преобразования (применение двухканальной схемы, использование дополнительных индуктивных элементов, корректировка стратегии управления (безреверсный вариант)).
6. Схемный вариант FACTS - контроллера, представляющего собой компенсирующее устройство с широким диапазоном регулирования как емкостного, так и индуктивного характера, управляемого с помощью ФРТ.
7. Физическая лабораторная модель ФРТ с системой управления.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается: применением классической теории электрических цепей, математического моделирования, структурно-имитационного (Matlab) и физического моделирования, а также сопоставлением результатов, полученных с помощью различных методов исследований.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на

1. Заседаниях и научно-технических семинарах Института Энергетики Молдовы.
2. FOREN 2014 - The 12th Wec Central & Eastern Europe Regional Energy Forum. key issue integrating renewable energy sources into the electricity transmission grid. București, 21-26 iunie 2014.
3. SIELMEN 2015 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems.
4. WEC Central and Eastern Europe Regional Energy Forum FOREN 201612-16 June 2016, Vox Maris Grand Resort, Costinesti, Romania.

5. . International Conference “Energy of Moldova – 2016. Regional Aspects of Development” 29 September – 01 October, 2016 - Chisinau, Republic of Moldova.
6. Conferința a studenților, masteranzilor și doctoranzilor (Universitatea Academiei de Științe a Moldovei) 15 Iunie 2017, Chișinău, Moldova.
7. Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor (Universitatea Tehnică a Moldovei) 28.martie 2019, Chișinău, Moldova.
8. 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), 21-23 May 2019, Cluj-Napoca, Romania
9. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 29 September to 2 October 2019, Bucharest, Romania
10. WEC CENTRAL & EASTERN EUROPE ENERGY FORUM – FOREN 2020, Energy Transition in South East Europe: Opportunities, Challenges, Perspectives Costinești, Romania, 7-10 September 2020

По теме диссертации получен 1 патент, опубликовано 11 статей (из них 6 -в базе данных THOMSON и 2 в SCOPUS, одна -с одним автором), и докладов на 6 международных конференциях.

Структура и объём диссертации

Диссертация общим объемом 190 страниц состоит из введения, пяти глав, выводов, библиографии, содержащей 168 источников и включает 7 приложений. Результаты исследований проиллюстрированы 117 рисунками и 15 таблицами. По результатам исследований опубликовано 18 научных работ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели, отражена научная новизна, положения, выносимые на защиту и практическая ценность, приведены сведения об апробации и публикации основных результатов исследований, отражена структура и объем работы.

В первой главе дана характеристика фазорегулирующего трансформатора, описана специфика и особенности таких устройств, описаны типовые конфигурации и варианты схемного исполнения ФРТ, представлены и изучены способы создания вольтодобавочного напряжения. Показано, что фазорегулирующие трансформаторы могут применяться для решения следующих задач: оптимизация нормального режима электрических сетей; плавка гололеда на проводах воздушных линий; использование ФРТ в составе УПКФРТ (Asisted PST) ; использование ФРТ в составе IPC (Interphase Power

Controller); управление переходными режимами для повышения устойчивости; снятие ограничений в послеаварийных и ремонтных режимах; совершенствование характеристик и увеличение резерва мощности подстанций; управление режимами межсистемных и межгосударственных связей. Проанализирован опыт разработки, производства и внедрения фазорегулирующих устройств в мировой практике.

Во второй главе описаны методы и средства, использованные в работе для достижения поставленных целей. В основу исследовательского процесса легли методы математического, структурного, имитационного и физического моделирования. Основой создания математических моделей стала теория электрических цепей. Для структурно имитационного моделирования использована среда MatLab–Simulink–SimPowerSystems. При физическом моделировании были применены следующие методы исследования: эксперимент, сравнение, измерение, анализ и синтез.

Предложены три схемных варианта ФРТ "однотрансформаторный с регулированием в нейтрали", "треугольник", "звезда". Для каждого ФРТ были созданы математические и структурно-имитационные модели, определяющие соотношения между режимными параметрами. Проведен сравнительный анализ режимных характеристик объектов исследования полученных как при математическом, так и при структурно-имитационном моделировании который показал близость полученных результатов.

В третьей главе были разработаны четыре варианта секционирования обмоток управления, в зависимости от требований к точности регулирования угла выходного напряжения, предъявляемых к фазорегулирующему трансформатору. Для каждого варианта управления были предложены законы переключения силовых ключей, которые позволили обеспечить необходимый диапазон регулирования угла фазового сдвига. Разработаны и исследованы четыре оригинальных варианта ФРТ - "модифицированный треугольник"; "инвертированный многоугольник"; "модифицированный многоугольник"; "в гексагональной конфигурации". Выполнен сравнительный анализ энергетических характеристик всех семи объектов исследования. Предложен способ снижения установленной мощности исследуемых устройств.

В четвертой главе был разработан и исследован преобразователь частоты (в трех модификациях), управляемый ФРТ построенный по схеме «треугольник». Доказана возможность качественного преобразования частоты и передачи активной мощности между энергосистемами с различными стандартами по поддержанию частоты.

Предложены и исследованы способы улучшения качества передачи в процессе частотного преобразования.

На базе ФРТ выполненного по схеме «многоугольник» разработано управляемое компенсирующее устройство с широким диапазоном регулирования реактивной мощности.

В пятой главе на базе «гексагонального» ФРТ была построена и исследована лабораторная модель. Проведено комплексное тестирование лабораторного образца, позволившее сделать вывод об эффективности принятых технических решений (применение технологии УПКФРТ, усовершенствование схемы коммутации и закона управления), которые позволили существенно уменьшить массогабаритные показатели ФРТ и оптимизировать процесс регулирования

В общих выводах и рекомендациях представлены полученные научные и теоретические результаты работы, которые могут сыграть роль стимула для теоретических исследований в сфере разработки, создания и применения новых типов FACTS - контроллеров, управляемых средствами силовой электроники.

1. ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА КАК ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

1.1. Общие положения

1.1.1. Структурная схема и специфика фазорегулирующих устройств

Фазорегулирующий трансформатор представляет собой специализированную форму трансформатора, основной функцией которого является изменение фазового сдвига между входным и выходным напряжением линии электропередачи, что позволяет перераспределять потоки активной мощности в заданном сечении в соответствии с выбранной стратегией управления режимом, то есть повысить степень управляемости энергосистемы [80].

Фазорегулирующий трансформатор в общем случае состоит из двух отдельных трансформаторов: параллельного и последовательного [6,11].

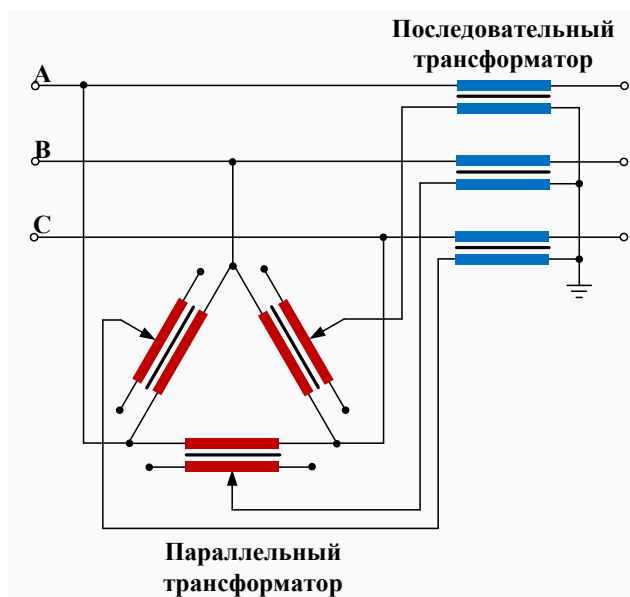


Рис.1.1. Схема фазорегулирующего трансформатора

Первичная обмотка параллельного трансформатора выполняется по схеме «треугольник», благодаря чему возникает трехфазная система напряжений, которые смещены относительно фазных напряжений источника на 90° . Вторичная обмотка может быть выполнена в виде изолированных фаз с блоком отпаяк, центр которого заземлен. Фазы вторичной обмотки подключены к первичной обмотке последовательного трансформатора через выход переключателя блока отпаяк. Обмотка данного трансформатора выполняется по схеме «звезда», с заземленной нейтралью. Вторичная обмотка последовательного трансформатора выполняется в виде изолированных фаз, которые включаются последовательно в расщелку соответствующих по фазе проводов

линии и добавляют к вектору напряжения источника сдвинутую по фазе на 90° компоненту.

Следовательно, общее напряжение на входе линии становится равным сумме вектора напряжения источника питания и вектора квадратурной составляющей, вносимой ФРТ, то есть изменяет свою фазу.

В зависимости от положения переключателя блока отпаек можно изменять амплитуду и полярность вектора квадратурного компонента, введенного ФРТ, и таким образом управлять величиной угла сдвига между векторами напряжения на входе и выходе линии в функции от режима работы линии.

К специфике этих устройств относят:

- значительные габариты, сравнимые с размерами линейных трансформаторов питающих подстанций;
- повышенная типовая мощность устройства, достигающая в классическом варианте 2.15 от проходной;
- высокая стоимость изготовления и установки преобразовательного оборудования.

Особенностью фазосдвигающего трансформатора является возможность его использования только в целях, масштабы которых оправдывают затраты на изготовление такого агрегата. Для личных потребительских нужд (в частных хозяйствах, например) его применение неоправданно и совершенно бессмысленно [86].

ФРТ - это сложная конструкция. Каждый из двух трансформаторов в «сухом» виде, в зависимости от типовой мощности, может иметь массу до 300 т. После установки на подстанции, наполнения маслом и соединения общая масса установки нередко переваливает за 1000 т. Стоимость фазорегулирующих трансформаторов из-за сложности их схемы довольно велика: 4-9 млн. долларов за систему мощностью более 2000 МВА [94]. ФРТ являются очень сложными устройствами, и для удовлетворения уникальных потребностей каждого клиента, они, как правило, разрабатываются по индивидуальному заказу. Однако затраченные на них средства с лихвой окупаются тем выигрышем, который удастся получить за счет оптимизации параметров режимов работы энергосистемы [7,94].

Время монтажа ФРТ, как показала практика, составляет только 12-18 месяцев, что обычно несоизмеримо меньше времени, требующегося на реконструкцию сети или прокладки новых линий электропередачи. Это может оказаться решающим фактором при выборе способа повышения пропускной способности линий электропередачи, в условиях рыночных отношений [11,13].

1.1.2. Способы регулирования фазового сдвига

Регулируемый фазовый сдвиг, вводимый ФРТ, осуществляется посредством введения вольтодобавочного напряжения между входом и выходом ФРТ в месте установки. Чем больше требуется ввести фазовый сдвиг, тем больше будет величина вольтодобавочного напряжения [25.]

Формирование вольтодобавочного напряжения осуществляется за счет использования напряжения линии. Это напряжение называется возбуждающим. Возбуждающее напряжение называется независимым, если оно является напряжением линии на входе ФРТ. Возбуждающее напряжение называется зависимым, если это напряжение формируется из напряжения на входе и выходе ФРТ. Существует несколько способов введения вольтодобавочного напряжения: *поперечное* регулирование, продольно-поперечное регулирование и симметричное регулирование [22,144].

При поперечном («квадратурном») регулировании ФРТ вводит вольтодобавочное напряжение, смещенное на ± 90 эл.град. относительно входного напряжения ФРТ, которое является возбуждающим (рис. 1.2а). При этом выходное напряжение ФРТ увеличивается по амплитуде и изменяется по фазе. Причем амплитуда будет тем больше, чем на больший угол сдвига будет производиться регулирование.

При продольно-поперечном регулировании ФРТ вводит вольтодобавочное напряжение из двух составляющих: продольной и поперечной (рис. 1.2б). Продольная составляющая смещена относительно входного напряжения на 180 эл. град., а поперечная – на ± 90 эл. град.

Поэтому, в этом случае изменение амплитуды напряжения является контролируемым, и она может быть любой, как больше, так и меньше амплитуды входного напряжения или равна ей. При небольших углах регулирования (не более 20 эл. град.) можно использовать только поперечную составляющую, а продольную составляющую вводить при углах, больших 20 эл. град. сдвига. Поэтому данный способ регулирования может применяться при небольших углах регулирования (не более 20 эл. град.).

При симметричном регулировании ФРТ вводит вольтодобавочное напряжение, смещенное на ± 90 эл. град. относительно возбуждающего напряжения ФРТ (рис. 1.2в). При этом выходное напряжение ФРТ изменяется только по фазе и не меняется по амплитуде. Поэтому данный способ регулирования может применяться при любых углах регулирования.

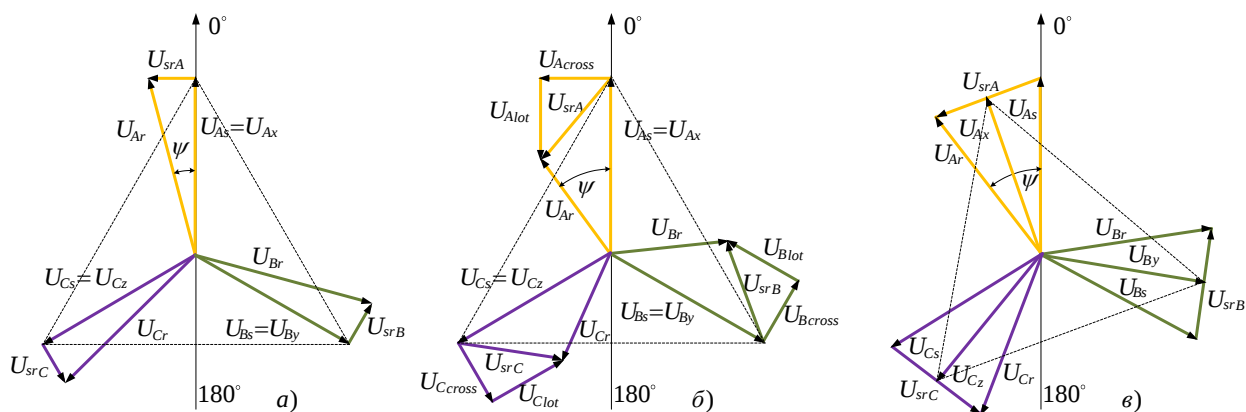


Рис.1.2. Способы регулирования выходного напряжения ФРТ: а) поперечное регулирование, б) продольно-поперечное регулирование, в) симметричное регулирование где: U_{As}, U_{Bs}, U_{Cs} – напряжение на входе ФРТ;

U_{Ar}, U_{Br}, U_{Cr} – напряжение на выходе ФРТ;

U_{Ax}, U_{By}, U_{Cz} – возбуждающее напряжение;

U_{sr} – вольтодобавочное напряжение;

U_{cross} – поперечная составляющая вольтодобавочного напряжения;

U_{lot} – продольная составляющая вольтодобавочного напряжения.

1.1.3. Типовые конфигурации ФРТ

При рассмотрении включения ФРТ в сеть необходимо учитывать режим его работы, что влияет на состав (конфигурацию) ФРТ.

Существуют исполнения ФРТ в однотрансформаторном виде (когда трансформатор является и вольтодобавочным, и возбуждающим) и двухтрансформаторном виде (когда один трансформатор является вольтодобавочным, другой – возбуждающим). На практике наибольшее распространение получил двухтрансформаторный вид исполнения ФРТ [111].

Фазорегулирующие трансформаторы могут быть выполнены в различном схемном исполнении, в зависимости от номинального напряжения, выходной мощности и необходимого угла фазового сдвига. Диапазон изменения угла фазового сдвига напрямую влияет на мощность и размер ФРТ [130,156].

Однотрансформаторное исполнение применяется для малых фазовых сдвигов и для более низких значений мощности и напряжения. Двухтрансформаторное исполнение обычно используется для передачи больших мощностей на высоких классах напряжения. Он состоит из двух трансформаторов, один из которых подключен к потенциалу линии, а другой связан с РПН или другим устройством регулирования величины угла фазового

сдвига. Как правило, это делается для вынесения блока коммутации на более низкий класс напряжения [72].

Однотрансформаторный ФРТ может быть выполнен с возбуждающими обмотками, соединенными в треугольник и одной регулировочной обмоткой с РПН и реверсивным переключателем, как показано на рисунке 1.3а. Эта конструкция называется «ассиметричным треугольником». В этом случае регулирующие обмотки наматываются на тот же магнитопровод, что и возбуждающая обмотка. Фазовый сдвиг между входной (S) и приемной (R) системами достигается путем подключения регулирующей обмотки, как показано на рис. 1.3а. Значения напряжения на зажимах S и R равны, т.е коэффициент трансформации ФРТ равен единице. На рис.1.3б представлена векторная диаграмма напряжений, иллюстрирующая принцип работы ФРТ выполненного по схеме «ассиметричный треугольник» Величина фазового сдвига изменяется при переключении отпаек обмотки управления с помощью переключателя РПН либо электронного коммутатора. Реверсирование обмотки управления позволяет увеличить диапазон регулирования.

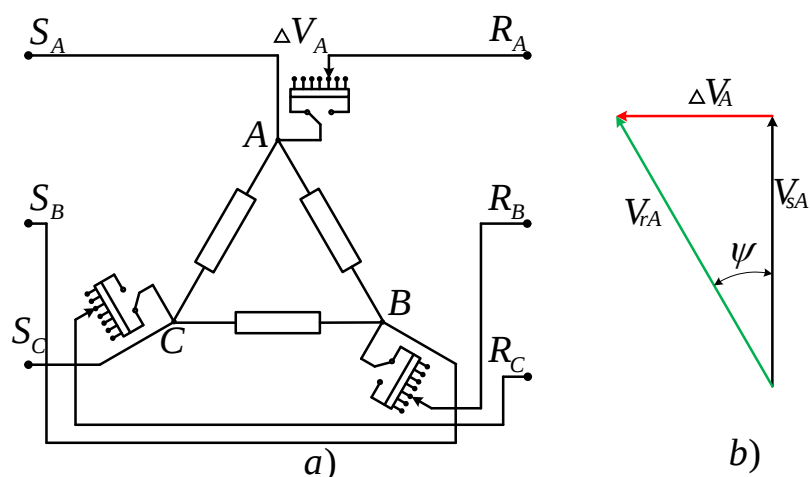


Рис.1.3. ФРТ по схеме «ассиметричный треугольник»:
а) Схема устройства, б) Однофазная векторная диаграмма

ФРТ также может быть выполнен с возбуждающими обмотками, соединенными в треугольник и двумя регулировочными обмотками без реверсивного переключателя, как показано на рис. 1.4.

Значения напряжения на зажимах S и R также равны между собой. Этот схемный вариант известен под названием «классический треугольник». Основная проблема с однотрансформаторной конфигурацией заключается в том, что регулирование осуществляется на напряжении источника (на высоком напряжении).

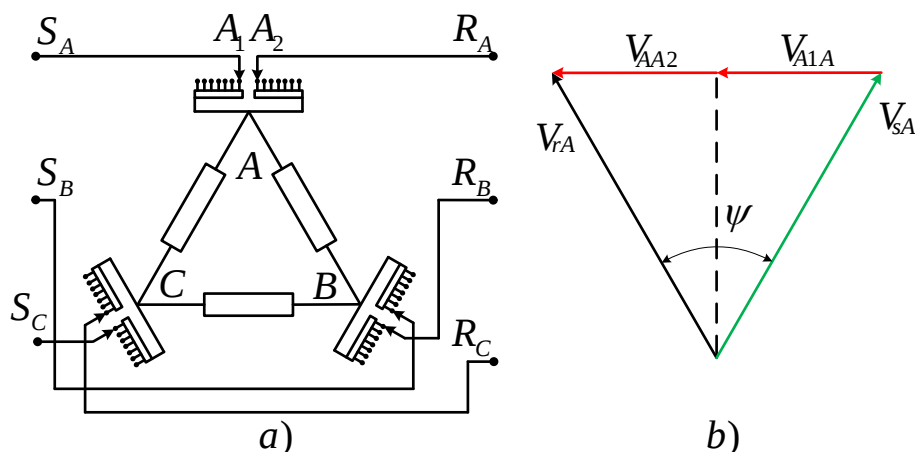


Рис.1.4. ФРТ по схеме «симметричный треугольник»:
а) Схема устройства, б) Однофазная векторная диаграмма

Однотрансформаторная схема ФРТ, показанная на рис.1.5, имеет РПН с линейным регулированием без возможности реверсирования. Этот тип ФРТ известен как «гексагональный». В этой конфигурации регулирующая обмотка наматывается на тот же стержень магнитопровода, что и основная возбуждающая обмотка. Регулирующая обмотка фазы А расположена между фазами В и С. Регулирование фазового сдвига производится, как показано на рисунке 1.5.

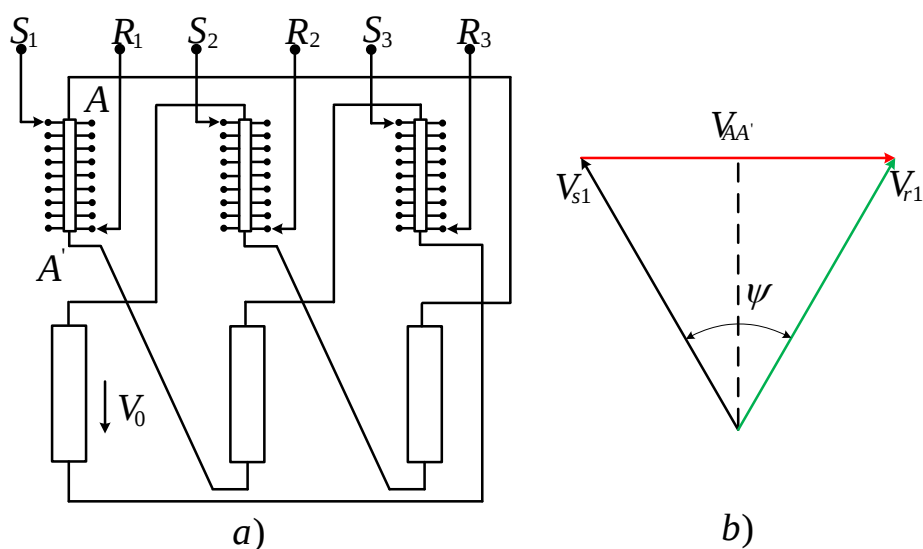


Рис.1.5. ФРТ по «гексагональной» схеме:
а) Схема устройства, б) Однофазная векторная диаграмма

Однотрансформаторные ФРТ, рассмотренные выше осуществляют регулирование на напряжении линии электропередачи. РПН и регулирующая обмотка непосредственно подвергаются воздействию системных возмущений (перенапряжений и токов короткого замыкания); поэтому стоимость РПН увеличивается. Может потребоваться присоединение

дополнительных сопротивлений к клеммам регулятора для ограничения токов короткого замыкания, поскольку сопротивление трансформатора равно нулю при нулевом фазовом сдвиге.

Двухтрансформаторная конструкция обычно используется для ФРТ большой установленной мощности и расширенного диапазона фазовых сдвигов. Как показано на рис.1.6, двухтрансформаторный ФРТ состоит из последовательного и параллельного трансформаторов с одинаковыми типовыми мощностями в отдельных баках для больших мощностей и более высоких напряжений или в одном баке для меньших мощностей и более низких напряжений [102]. Обмотка последовательного трансформатора между клеммами источника и нагрузки на каждой фазе делится на две половины. Первичная обмотка параллельного трансформатора соединена со средней точкой этих полуобмоток последовательного трансформатора. Преимущество этой компоновки состоит в том, что регулировочная обмотка параллельного трансформатора и обмотка "aa" последовательного трансформатора могут быть сконструированы независимо, в то время как обмотки "AA" и "BB" подключены к шинам высокого напряжения.

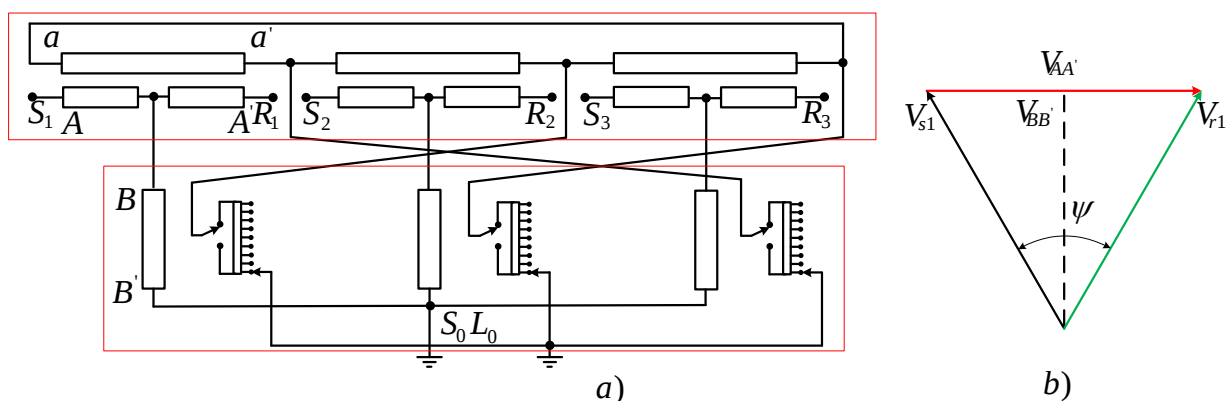


Рис.1.6. Двухтрансформаторная схема ФРТ
а) Схема устройства, б) Однофазная векторная диаграмма

Уровень напряжения регулирования и обмотка "aa" могут быть выбраны по критерию уменьшения затрат на средства управления.

1.1.4. Средства управления ФРТ

Важным элементом ФРТ является устройство осуществляющее регулирование угла фазового сдвига. Управление может быть выполнено на основе электромеханических переключателей, или с использованием средств силовой электроники.

В мировой практике широко применяются фазорегулирующие трансформаторы с механическими переключателями числа витков обмоток трансформатора - регулятор напряжения под нагрузкой (РПН) [68].

Однако ФРТ с устройствами РПН не отличаются высокой надежностью [5]. устройства с механическими переключателями в трансформаторах с РПН выходят из строя в 40% случаев всех повреждений. Из-за наличия движущихся частей трансформаторы с РПН требуют больших затрат на обслуживание и ремонт по сравнению с трансформаторами с ПБВ нерегулируемыми под нагрузкой.

В устройствах РПН используются многочисленные схемы и способы, позволяющие исключить прерывание тока и возникающую при этом дугу между смежными отпайками обмотки (и как следствие – возникновение значительных напряжений) при переходе с одной отпайки на другую.

ФРТ, управляемые механическими устройствами РПН, не имеют достаточного быстродействия, поскольку переключение только одной ступени регулирования занимает до 5,4 с. Число переключаемых ступеней может достигать 16 и более. Поэтому переход на нужную ступень регулирования может составить несколько десятков секунд. Такие устройства хорошо использовать в тех случаях, где скорость переключения не играет роли. Контролировать динамику переключения здесь, разумеется, невозможно, однако у этой технологии есть свои преимущества, такие как простота исполнения, освоенная технология и относительно низкая цена.

Современные электрические сети являются сложными динамическими системами, поэтому для решения вопросов повышения степени управляемости требуются быстродействующие устройства. ФРТ с РПН не могут своевременно среагировать на внезапное нарушение режима работы энергосистемы (КЗ, отключения ВЛ или трансформаторов, качания синхронных машин), связанное с мгновенным изменением баланса активной и реактивной мощностей, что может привести к неустойчивому режиму работы генераторов ЭЭС. Поэтому в основе технологии гибких (управляемых) электропередач переменного тока должны находиться быстродействующие полупроводниковые устройства [6,33].

Быстродействующие ФРТ, управляемые коммутаторами, построенные на основе силовых полупроводниковых приборов позволяют плавно подстраиваться под текущий режим работы ЭЭС, обеспечивая ее устойчивость в переходных процессах с оптимальными параметрами.

Однако сдерживающим фактором практического применения ФРТ с современными средствами управления является достаточно высокая стоимость силовых полупроводниковых элементов, что вынуждает ограничивать функциональные свойства средств управления за счет осуществления минимально необходимых операций в ущерб потенциально существующим возможностям. Экономия средств, полученная за счет снижения типовой мощности ФРТ, может быть использована для расширения его управляющих функций за счет более свободного применения силовых электронных коммутаторов.

Основными критериями, влияющими на выбор ФРТ, являются [11]:

1. требуемая мощность и угол сдвига фаз,
2. номинальное напряжение,
3. мощность короткого замыкания подключаемых систем,
4. условия транспортировки,
5. характеристики системы управления.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод о целесообразности разработки новых схемных вариантов фазорегулирующих устройств трансформаторного типа с целью оптимизации их характеристик, улучшению режимных параметров и формулированию новых задач, которые можно решать с помощью этих устройств.

1.1.5. Функции, реализуемые ФРТ в энергосистеме

1. оптимизация нормального режима электрических сетей с точки зрения реализации более благоприятных сценариев загрузки линий электропередачи относительно естественного распределения потоков мощности [60,61,112,76,39,75,155,121,54];
2. плавка гололеда на проводах воздушных линий методом наложения контурного тока промышленной частоты, создаваемого с помощью ФРТ, на рабочий ток соответствующей ветви высоковольтной сети [105,62,63,139,147,50];
3. регулируемая продольная компенсация линии электропередачи, реализованная на основе параллельного соединения конденсаторной батареи и фазорегулирующего устройства [103,44];
4. использование ФРТ в составе IPC (Interphase Power Controller) для поддержания стабильного уровня обменной мощности между узлами энергосистемы [43,45,46,36,120,164,132,125];
5. управление переходными режимами и как следствие повышение уровня статической и динамической устойчивости [64,135,69,53,34,124,55];

6. для снятия ограничений на выдачу мощности в различных послеаварийных и ремонтных режимах распределительной электросети и расширения возможного диапазона выдачи мощности в нормальных режимах;
7. совершенствование характеристик и увеличение резерва мощности подстанций [11];
8. управление режимами межсистемных и межгосударственных связей [42,157,134,138,158,148,74,40].

При использовании ФРТ для регулирования потоков мощности, потери могут уменьшаться на одних участках электрической сети, но существенно увеличиваться на других участках сети. Это в свою очередь может привести не только к увеличению потерь, но и к перегрузке ЛЭП. Поэтому установка ФРТ обязательно должна согласовываться с системными операторами. Для значительного изменения потоков мощности в сложно-замкнутой сети появляется необходимость в установке нескольких ФРТ (4- в проекте в Чехии 6- в Нидерландах 8-в Швейцарии) [21]. Использование этих устройств связано с большими затратами и приводит к проблеме координации настроек этих ФРТ при изменении режимов и топологии сети.

1.2. Опыт разработки и внедрения фазорегулирующих трансформаторов

1.2.1. Ведущие производители ФРТ

Ведущими производителями фазорегулирующих трансформаторов являются следующие компании:

- Siemens.

Фазорегулирующий трансформатор, изображенный на рис.1.7 имеет мощность 600МВА и установлен на подстанции в Слоунии. Угол фазового сдвига $\pm 40^\circ$. Стоимость данного ФРТ 18 млн. долларов [146].

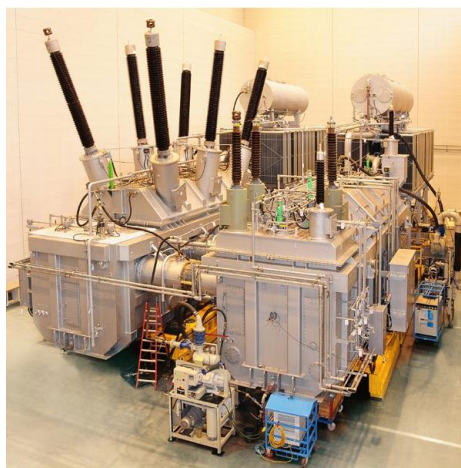


Рис.1.7. Фазорегулирующий трансформатор компании Siemens.

- ABB

Фирма производит ФРТ напряжением системы до 420 кВ, проходной мощностью до 1,630 МВА, угол сдвига 70 градусов. На рис. 1.8 представлен ФРТ этой компании [28].



Рис.1.8. Фазорегулирующий трансформатор компании ABB

- Tamini

Компания *Tamini*, заняла прочное место на рынке по производству ФРТ и выпускает их мощностью до 1800 МВА и напряжением до 420 кВ. На рис. 1.9 представлен ФРТ этой компании [150].



Рис.1.9. ФРТ компании Tamini

- SGB-SMIT Group

На рис.1.10 представлен ФРТ этой компании: мощность 350МВА, напряжение 115кВ [143].



Рис.1.10. ФРТ компании SGB-Smit

- CG Power and Industrial
- Toshiba. Эта компания производит ФРТ мощностью до 1000 МВА и напряжением до 275кВ [154].
- Baoding Tianwei Baobian Electric
- Estel Company
- Bharat Heavy Electricals (BHEL)
- Запорожтрансформатор

Трансформатор, установленный в Казахстане, представлен на рис.1.11.



Рис.1.11 Общий вид ФРТ в Казахстане

География применения фазосдвигающих трансформаторов достаточно обширна:

- Северная Америка (США, Канада и Мексика)
- Европа (Германия, Франция, Великобритания, Италия и др.)
- Азиатско-Тихоокеанский регион (Китай, Япония, Корея, Индия и Юго-Восточная Азия)
- Южная Америка (Бразилия, Аргентина, Колумбия и др.)
- Ближний Восток и Африка (Саудовская Аравия, ОАЭ, Египет, Нигерия и Южная Африка)

Рост применения фазосдвигающих трансформаторов, будет обусловлен развивающимися странами, такими как Индия, Бразилия и Саудовская Аравия. Тем не менее, ожидается, что в некоторых развитых странах, таких как США, Япония и Австралия, в долгосрочной перспективе использование ФРТ будет снижаться, что ограничит темпы роста рынка в этих странах в будущем.

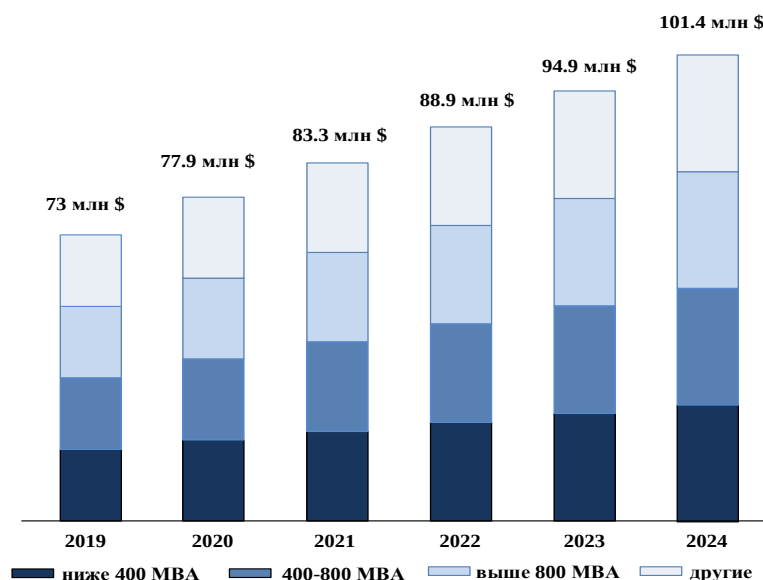


Рис.1.12. Динамика роста рынка фазосдвигающих трансформаторов

Ожидается, что мировой рынок фазорегулирующих трансформаторов в ближайшие пять лет вырастет примерно на 6,8% в среднем и достигнет 100 млн. долл. США в 2023 году по сравнению с 73 млн. долл. США в 2019 году (рис.1.12) [83].

История появления трансформаторов этого класса не очень богата датами и событиями, хотя первые упоминания и достоверная информация о них появилась еще в 1969 году. В дальнейшем в конце века они были введены в эксплуатацию в ряде европейских стран (в 1996 году – во Франции и Германии, в частности). В Бельгии, Голландии и Казахстане они появились чуть позже – к 2009-му году.

1.2.2. Фазоповоротные трансформаторы в Европе

В странах Евросоюза ведется достаточно интенсивная работа по выявлению перспективных мест установки фазорегулирующих трансформаторов в соответствующих энергосистемах, определению эффективности их применения, а также по разработке и изготовлению промышленных образцов ФРТ различной номинальной мощности и на различные классы напряжения [87,7,149].

В Великобритании фазоповоротные трансформаторы применяются в электрической сети с 1969, когда был введен в эксплуатацию первый образец напряжением 275кВ. В настоящее время четыре ФРТ (мощностью 2750МВА, 400кВ с регулятором угла сдвига фаз, имеющим 11 ступеней) успешно работают вместе с существующими пятью мощностью 2000МВА, 400кВ и шестью 275кВ, 750МВА.

В Британской электрической сети предусмотрена возможность управления потоками мощности после отключения одной или большего количества линий электропередачи и, по мнению специалистов Великобритании, применение фазорегулирующих трансформаторов для этих целей является очень эффективным решением. Достоинство этого способа – дополнительные гарантии надежности для электроснабжения потребителей электроэнергии без строительства новых линий. При этом минимизируется воздействие на окружающую среду передающей сети [126,38,37].

Франция имеет большой опыт разработки и внедрения ФРТ в собственные электрические сети, а также электрические сети других государств. Стратегия управления потоками мощности в сети состоит в следующем:

«Лечебный режим»: ФРТ работает с малым сдвигом по фазе в нормальном режиме работы и, в случае внезапного отключения одной из линий, сдвиг по фазе автоматически изменяется, чтобы уменьшить поток мощности на перегруженных линиях и не допустить их отключения.

«Профилактический режим»: ФРТ работает с постоянным сдвигом фазы и перераспределяет потоки мощности в нормальном режиме работы, чтобы повысить КПД существующей электрической сети. В таблице 1.1, представлены ФРТ, установленные во французской энергосистеме.

Таблица 1.1 ФРТ, установленные во французской энергосистеме

Место установки	Кол-во	Мощность, МВА	Напряжение сети, кВ	Угол сдвига фазы	Год ввода в действие	Производитель
RTE	1	565	240/ 240	$\pm 27,5^\circ$	2013	ABB
RTE	1	63	66/ 66	$+18^\circ / -22^\circ$	2011	ABB
Niort		438	225	$\pm 11^\circ$	2006	
Guarbecque		438	225	$\pm 11^\circ$	2006	
Sainte-Cecile		61	63	$\pm 23^\circ$	2005	
La Praz		1181	400	$\pm 10^\circ$	2002	
Rance		413	225	$\pm 10^\circ$	2001	
Pragneres	2	312	225	$\pm 21,4^\circ$	1998	

Длительный опыт эксплуатации ФРТ во Франции доказывает эффективность их применения для решения проблемы потокораспределения в электрических сетях

переменного тока. Их использование выгодно, так как они симметрируют ток между несколькими линиями, позволяют не прибегать к размыканию линий и тем самым обеспечивают более оптимизированное использование существующей энергосистемы. [95]

Бельгия и Нидерланды в основном используют ФРТ на подстанциях, где две национальные сети связаны друг с другом. В комплект ФРТ входят системы защиты и управления, которые должны адекватно реагировать не только на команды системного оператора, но и на различные случайные события в системе (удары молнии, повреждения линий, выключателей) [114,115,131,118]. В таблице 1.2, представлены ФРТ, установленные в странах Евросоюза.

Таблица 1.2. ФРТ, установленные в Европейской энергосистеме

Место установки	Кол-во	Мощность, МВА	Напряжение сети, кВ	Угол сдвига фазы	Год ввода в действие	Производитель
Бельгия и Нидерланды						
ELIA	3	1400	400/ 400	$\pm 25^\circ$	2007	ABB
Monceau.		400	220/150	-15° to $+3^\circ$		
Германия						
RWE	4	350	400/ 120	$+27^\circ$	*2016	ABB
Amprion	1	600	230/ 230	$\pm 20^\circ$	2011	ABB
Steag	1	150	110(65)	$\pm 31^\circ$	2008	ABB
Stw Ulm	1	100	110/ 110	$+7^\circ$	2005	ABB
Stw Saarbrücken	1	90	110/ 110	$+42^\circ$	2003	ABB
GKW Mannheim	2	200	110/ 110	$\pm 20^\circ$	1976	ABB
NWK	1	300	220/ 220	$\pm 30^\circ$	1975	ABB
Badenwerk & EVS	1	300	220/ 220	$\pm 28^\circ$	1968	ABB
Швейцария						
Alpiq	4	150	380/ 220	$\pm 10^\circ$	*2015	ABB
EWZ	2	250	220/ 150	$\pm 11,2^\circ$	2010	ABB
AET Mendrisio	1	400	400/ 155	$\pm 23.7^\circ$	2008	ABB
EWZ	1	250	220/ 150	$\pm 11,2^\circ$	2007	ABB
EOS	1	200	240/ 132	$\pm 9.6^\circ$	1997	ABB
Дания						
IFV Power Company	1	500	400/ 132	$+22^\circ$	1993	ABB
Австрия						
Austrian PowerGrid	3	600	232 /232	$\pm 35^\circ$	2006	ABB
Испания						
REE	1	1270	400/ 400	$\pm 10^\circ$	2010	ABB
REE	1	750	230/ 230	$\pm 30^\circ$	2010	ABB
Польша						
Эти четыре ФРТ защищают сеть Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. в Польше от потоков энергии север-юг, вызванных производством зеленой энергии в Германии.						
	4	1200	410	$\pm 20^\circ$		Siemens

Продолжение Таблицы 1.2.

Место установки	Кол-во	Мощность, МВА	Напряжение сети, кВ	Угол сдвига фазы	Год ввода в действие	Производитель
Словения						
Два ФРТ обеспечивают быстрое повторное соединение в сети Словения-Италия. Они облегчают торговлю и экспорт электроэнергии компанией Elektro Slovenija.						
Divaca	2	600	400	$\pm 40^\circ$	2010	Siemens
Италия						
TERNA Padriciano	1	370	230/ 230	$\pm 32^\circ$	2007	ABB
TERNA Rondissone	2	1630	400/ 400	$+18^\circ$	2003	ABB
AGSM Verona	1	60	220/ 130	$\pm 10^\circ$	1984	ABB
AGSM Verona	1	60	220/ 130	$\pm 10^\circ$	1977	ABB

1.2.3. Фазоповоротные трансформаторы: применение в Америке

Об эффективности применения ФРТ можно судить и по количеству подобных устройств, установленных в межсистемных связях США. В практическом отношении среди новых разработок в данной области заметно выделяются работы, проводимые в энергетической кампании Hydro-Quebec (Canada) и связанные с разработкой и внедрением устройства IPC (Interphase Power Controller) [159,117,47].

Приведенный в таблицах 1.3, 1.4 обзор установленных в США и Канаде ФРТ, показывает, какое значение там придается вопросам повышения управляемости, устойчивости и надежности для обеспечения высокого качества энергоснабжения потребителей.

Таблица 1.3. Параметры ФРТ, установленных в США.

Место установки	Кол-во	Мощность, МВА	Напряжение сети, кВ	Угол сдвига фазы	Год ввода в действие	Производитель
Con Edison	1	575	345/ 345	± 40	2013	ABB
Con Edison	1	300	138/ 138	± 25	2013	ABB
Con Edison	1	300	138/ 138	± 25	2012	ABB
KeySpan	1	450	138/ 138	± 58	2002	ABB
Commonwealth Edison	1	336	138/ 138	± 30	2001	ABB
Detroit Edison	1	675	240/ 240	± 47	2000	ABB
San Diego Gas & Electric (SDG & E)	2	400	230	$+ 31 \text{ to } - 80$		Siemens
Commonwealth Edison	1	336	138/ 138	± 15	1999	ABB
Southwestern PS	1	150	120/ 120	± 53	1996	ABB
Con Edison	1	234	138/ 138	± 25	1996	ABB
Sierra Pacific	2	300	345/ 345	± 58	1996	ABB
PSE&G	2	885	230/ 230	± 32	1994	ABB
Commonwealth Edison	1	336	138/ 138	± 15	1991	ABB

Продолжение Таблицы 1.3.

Место установки	Кол-во	Мощность, МВА	Напряжение сети, кВ	Угол сдвига фазы	Год ввода в действие	Производитель
Utah P&L	1	302	230/ 230	± 74	1990	ABB
Utah P&L	2	315	345/ 345	± 75	1990	ABB
Nevada Power	2	336	345/ 345	± 73	1990	ABB
WAPA	4	300	345/ 345	+ 67 to - 60	1988	ABB
Montana Power	1	100	161/ 161	± 60	1980	ABB
Montana Power	1	300	230/ 230	± 60	1980	ABB
Commonwealth Edison	1	336	138/ 138	± 15	1977	ABB
Salt River Project	1	350	230/ 230	+ 47 to - 32	1977	ABB
Puget Sound P&L	1	400	118/ 118	0 to +21	1975	ABB
PSE&G	3	672	230/ 230	± 30	1973	ABB
PEPCO	2	150	135/ 135	± 25	1972	ABB
LILCO	1	220	138/ 138	± 10	1971	ABB
PSE&G	1	403	230/ 230	± 25	1971	ABB
Con Edison	1	575	345/ 345	± 25	1971	ABB
Utah P&L	1	100	161/ 161	± 30	1965	ABB
Idaho Power	1	300	230/ 230	0 to + 30	1965	ABB
Con Edison	2	122	138/ 138	± 25	1963	ABB

Таблица 1.4 Диапазон параметров ФРТ, установленных в Канаде

Место установки	Кол-во	Мощность, МВА	Напряжение сети, кВ	Угол сдвига фазы	Год ввода в действие	Производитель
Montana Alberta Tie	1	330	230/ 240	± 79	2006	ABB
Ontario Hydro	2	845	240/ 240	± 47	2000	ABB
Manitoba Hydro	2	200	138/ 230	± 60	1997/8	ABB
New Brunswick Power	1	225	138/ 138	+ 30	1991	ABB
Saskatchewan Power	1	200	250/ 230	± 70	1981	ABB
Ontario Hydro	1	300	240	± 40	1978	ABB
Ontario Hydro	1	500	230	± 40	1974	ABB
Manitoba Hydro	2	200	230/ 115	± 60	1971	ABB
Dow Chemical	1	41,6	13,4	± 15	1966	ABB
Ontario Hydro	1	300	240	± 40	1963	ABB
Hydro-Quebec	4	150	230		1956	ABB

Диапазон параметров и страны, в которых установлены ФРТ в Южной Америке, приведены в таблице 1.5

Таблица 1.5. Параметры ФРТ, установленные в Южной Америке

Место установки	Кол-во	Мощность, МВА	Напряжение сети, кВ	Угол сдвига фазы	Год ввода в действие	Производитель
Чили						
Transelec	2	350	230/ 230	±12	2011	ABB
Перу						
Cor. De Energia Elec.	1	100	210/210	± 20	1970	
Бразилия						
FURNAS - ANGRA	1	400	138/ 138	±21	2000	

1.2.4. Фазоповоротные трансформаторы: применение в Азии

В 2009 году в Казахстане введена в эксплуатацию межрегиональная линия электропередачи 500кВ «Северный Казахстан - Актюбинская область» протяженностью 487км с двумя подстанциями - ПС 500кВ Житикара и ПС 500кВ Ульке. На ПС 500кВ Ульке впервые в СНГ используется фазоповоротный трансформатор с параметрами: 400МВА, 500/220кВ, диапазон сдвига фазы (0 - +20) градусов [13].

ФРТ спроектирован и изготовлен компанией «Запорожтрансформатор». На обеих подстанциях установлены системы мониторинга и управления компании Siemens, а также системы релейной защиты и автоматики того же производителя. ФРТ позволит минимизировать энергопотоки по линиям 220 кВ юга России и загрузить линию 500 кВ Житикара-Ульке электроэнергией казахстанских источников. Новая линия соединила актюбинский энергоузел с ЕЭС Казахстана. Ввод объекта в строй решает проблему энергодефицита Актюбинской области за счет поставок электроэнергии от Аксуской и Экибастузских ГРЭС, повысить надежность электроснабжения потребителей и обеспечить потребности региона в электроэнергии до 2015 года.

Компанией BHEL, крупнейшим производителем трансформаторов в Индии, изготовлен фазосдвигающий трансформатор с номинальным напряжением 400 кВ/220 кВ и 315 МВА, фазовый сдвиг + 15 градусов. С вводом в действие вышеупомянутого ФРТ существующие перегруженные линии 220 кВ должны быть освобождены, а мощность может передаваться по линии 400 кВ, что повышает эффективность передачи как линий 400 кВ, так и 220 кВ, а также предотвращает коллапс сети в случае нестабильности системы [32].

В Японии предлагается использование ФРТ для решения проблемы перегрузки линий из-за широкого внедрения солнечных электростанций. В [163] предложен метод, основанный на чувствительности линий к потокам активной мощности. На различных

моделях было показано, что применение ФРТ для ЭЭС с широким внедрением солнечных установок является эффективным способом решения вышеописанной проблемы.

1.3 Выводы по первой главе

1. Выполнен обзор литературы состояния проблемы разработки и применения ФРТ в мировой практике, доказывающий актуальность и научную значимость выбранной темы исследования. Показано, что фазорегулирующие трансформаторы могут применяться для решения ряда задач: управления режимами межсистемных и межгосударственных связей; реализации оптимальных сценариев загрузки линий электропередач; плавки гололеда и профилактического прогрева проводов ВЛ; построения новых FACTS контроллеров, управляемых с помощью ФРТ; эффективного управления переходными режимами и повышения запаса устойчивости и улучшения качества электроэнергии.

2. Рассмотрена специфика фазорегулирующих устройств трансформаторного типа, приведены векторные диаграммы напряжений, иллюстрирующие различные способы получения вольтодобавочного напряжения для регулирования угла фазового сдвига (поперечное регулирование, продольно-поперечное регулирование и симметричное регулирование). Показана связь между способом создания напряжения вольтодобавки и возможным диапазоном изменения углов регулирования. Описаны наиболее распространенные варианты конфигурации ФРТ зависящие от номинального напряжения, проходной мощности и требуемой величины угла фазового сдвига. Определены условия, влияющие на выбор схемного варианта и компоновки ФРТ. Охарактеризованы достоинства и недостатки такого рода устройств. Показана необходимость разработки новых схемных вариантов с улучшенными техническими параметрами.

3. Проанализирован опыт разработки и внедрения фазорегулирующих устройств в мировой практике. Показано, что фазоповоротные устройства применяются не только для повышения пропускной способности сложно-замкнутой сети (как в Великобритании), но и для управления межгосударственными потоками мощности (как в Германии и Нидерландах, Казахстане, Швейцарии), а также для перераспределения потоков мощности с целью разгрузки сетей более низкого напряжения и уменьшения потерь; имеются даже предложения использовать ФРТ для обеспечения выполнения критерия надежности $n-1$ при отключении линии электропередачи (как в Швейцарии).

2.МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

2.1.Методология исследования трансформаторных фазорегулирующих устройств

2.1.1. Цели моделирования и основные свойства моделей

Методология научных исследований проявляется в соответствующих методах – общих правилах и приемах, следование которым позволяет получить объективные результаты и снизить риск ошибочных и непроизводительных действий.

В настоящей работе были использованы как общие (теоретические, универсальные), так и частные (эмпирические или практические) методы исследования:

Моделирование – это процесс познания объектов и явлений путем построения и изучения их моделей. Модель объекта – это материальный или мысленно представляемый объект, который замещает объект – оригинал, отображая или воспроизводя типичные его свойства (геометрические, физические, динамические, функциональные) [91].

Основные свойства моделей

Модели обладают рядом свойств, от которых зависит успех их применения в практике моделирования. Отметим лишь некоторые из них, наиболее важные [91].

- Адекватность – это степень соответствия модели исследуемому реальному объекту. Она никогда не может быть полной. На практике модель считают адекватной, если она с удовлетворительной точностью позволяет достичь целей исследования.
- Простота (сложность) также является одной из характеристик модели. Чем большее количество свойств объекта описывает модель, тем более сложной она, оказывается. Не всегда чем сложнее модель, тем выше ее адекватность. Надо стремиться найти наиболее простую модель, позволяющую достичь требуемых результатов изучения.
- Потенциальность– способность модели дать новые знания об исследуемом объекте, спрогнозировать его поведение или свойства.

Основой для создания моделей объектов исследования (FACTS-контроллеров) являлись законы электрофизики и электротехники.

Цели моделирования

- изучение механизма явлений (познавательная цель) (расчет и анализ режимных параметров объектов исследования)
- управление объектами и системами с целью выработки по модели оптимальных управляемых воздействий и характеристик системы. (Разработка, и корректировка законов и стратегии управления объектами исследования);

В обоих случаях модель создается для определения и прогноза интересующих нас характеристик объекта.

В работе использованы следующие виды моделирования: математическое, структурно – имитационное, физическое.

2.1.2. Математическое моделирование

Математическое моделирование является одним из видов идеального моделирования, при котором построение модели реального объекта осуществляется путем описания его свойств, отношений и взаимодействия с окружающей средой на языке математики, а исследование модели проводится с использованием тех или иных математических методов. [77,88] Построение математических моделей тесно связано с методом формализации, суть которого заключается в передаче структуры или сущности явления или объекта модели путем использования математических схем, формул, символов.

Реализованная на компьютере математическая модель называется компьютерной математической моделью, а проведение целенаправленных расчетов с помощью компьютерной модели называется вычислительным экспериментом.

Методы формализации и математического моделирования использованы в главе 2 для получения выражений описывающих режимные характеристики исследуемых объектов.

2.1.3. Структурно-имитационное моделирование

Структурное моделирование - это моделирование систем и подсистем, т.е. моделирование состава и связями между элементами системы. Правильная организация структуры всех подсистем определяет оптимальное функционирование всей системы в целом.

Метод имитационного моделирования в общем виде можно охарактеризовать как экспериментальный метод исследования реальной системы по ее имитационной модели, который сочетает особенности экспериментального подхода и специфические условия использования вычислительной техники.

В процессе имитационного моделирования исследователь имеет дело с четырьмя основными элементами [91]:

- реальная система;
- логико-математическая модель моделируемого объекта;

- имитационная (машинная) модель;
- ЭВМ, на которой осуществляется имитация – направленный вычислительный эксперимент.

При имитационном моделировании результат нельзя заранее вычислить или предсказать. Поэтому для прогноза поведения сложной системы (электроэнергетической и т.п.) необходим эксперимент, имитация на модели при заданных исходных данных.

Имитационное моделирование сложных систем используется при решении следующих задач.

1. Постановка задачи исследования не представлена в логически завершённом виде, но необходимо реализовать процесс познания объекта способом моделирования режимов его работы.
2. Известно аналитическое описание исследуемого объекта и аналитические методы решения задачи, но математические процедуры столь сложны и трудоемки, что имитационное моделирование даёт более простой способ решения задачи.
3. Известны и доступны для применения методы оценки параметров сложных систем, но при этом стоит задача наблюдения за вариацией параметров их элементов в течение определённого периода.
4. Когда имитационное моделирование является единственным способом исследования сложной системы из-за невозможности наблюдения явлений в реальных условиях.
5. Необходимо контролировать протекание процессов в сложной системе путём ускорения или замедления явлений в ходе имитации.
6. Когда изучаются новые ситуации в сложных системах, о которых малоизвестно или ничего неизвестно.
7. Когда особое значение имеет последовательность событий в проектируемой сложной системе и модель используется для предсказания "узких мест" функционирования системы.

В настоящее время используется метод анализа режимов работы электротехнических устройств и объектов, базирующийся на упрощении расчетов, связанных с идеализацией параметров элементов энергосистем. Для этого обычно используются специальные компьютерные программы, позволяющие моделировать системы энергоснабжения. Такие программы предусматривают использование блоков, моделирующих основные элементы энергосистем, из которых составляется модель системы. При этом математическая база построения таких блоков предусматривает

наибольшее приближение модели к реальной конструкции и учитывает практически все параметры элементов.

Основной средой, позволяющей моделировать электроэнергетические распределительные системы, является MatLAB – Simulink – SimPowerSystems (была применена в главах 2,3,4,5) [26].

При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает [12,26].

Моделирование с помощью Simulink состоит из следующих шагов:

- выбор или создание блоков модели;
- организация связей между блоками модели;
- установка параметров отдельных блоков;
- организация вывода результатов моделирования;
- запуск модели и получение результата.

Несомненным достоинством Simulink является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием имитационных блоков SimPowerSystems, а систему управления - с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит, повысить ее устойчивость и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems (в дальнейшем SPS-модели) можно использовать блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MatLAB, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем.

2.1.4. Физическое моделирование

Физическое моделирование — метод экспериментального изучения различных физических явлений, основанный на их физическом подобии. В технике физическое моделирование используется при проектировании и сооружении различных объектов для определения на соответствующих моделях тех или иных свойств (характеристик) как объекта в целом, так и отдельных его частей. К физическому моделированию прибегают не только по экономическим соображениям, но и потому, что натурные испытания очень трудно или вообще невозможно осуществить, когда слишком велики (малы) размеры натурального объекта или значения других его характеристик (давления, температуры, скорости протекания процесса и т. п.).

В представленной работе использование метода состояло в создании лабораторной физической модели фазорегулирующего трансформатора, имеющего гексагональную конфигурацию в уменьшенных масштабах (на напряжение 230В, мощностью 10 кВт), и проведении экспериментов на этой модели. Экспериментальные данные, полученные методом физического моделирования, могут быть распространены на реальное устройство, с учётом критериев подобия.

Эксперимент — толкуется как воспроизведение наблюдения или явления в определенных условиях. Экспериментом может служить также опыт, целью которого будет проверка (опровержение или подтверждение) имеющихся положений. Главное — чтобы во время проведения исследования присутствовали два момента: доказательность и повторяемость. Задача эксперимента заключается не только в наглядной демонстрации или открытии какого-то свойства, но и в способности к воспроизведению. В процессе исследования проводились как расчетные эксперименты (в среде MatLAB – Simulink – SimPowerSystems), так и лабораторные эксперименты (в процессе тестирования физической модели ФРТ).

Сравнение — считается одним из самых популярных методов исследования. В работе осуществлялось сопоставление объектов исследования (ФРТ) с целью выявления их сходных и отличительных признаков, соотношений их свойств и технических характеристик [89]. Сравнение выполнено для объектов, образующих определенный класс, группу (ФРТ). Исследуемые FACTS контроллеры сравнивались по признакам, существенным с точки зрения оценки качества процесса преобразования частоты и передачи мощности (значения коэффициентов гармонических искажений, степень стабильности передаваемой мощности). Кроме того метод применен для сопоставления результатов математического, структурно-имитационного и физического моделирования.

Измерение — является достаточно точным методом исследования. В его основе лежит операция или процедура получения численного значения размера, характеризующего одно или несколько свойств объекта (предмета, процесса, явления) и удовлетворяющего требованию единства измерений. В представленной работе метод применялся при проведении экспериментальных исследований на физической модели, результаты которых приведены в гл.5.

Анализ — это метод познания частей как элементов сложного целого, позволяющий выявить состав элементов объекта исследования, их свойства и функции, наиболее существенные связи между элементами объекта, выделить главные и второстепенные факторы.

Синтез — это операция практического или мысленного объединения в единое целое отдельных частей, их свойств, отношений, выделенных посредством анализа. Синтез акцентирует внимание на функциях частей целого, позволяет понять, почему эти части действуют именно так, и через это понимание роли отдельных частей объяснить поведение объекта как единого целого. Методы анализа и синтеза применялись при создании моделей, а также в процессе обработки полученных результатов.

Достоинства и недостатки использованных в работе методов моделирования [81,82,91] приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Достоинства и недостатки различных способов моделирования

Моделирование	Достоинства	Недостатки
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ	• высокая универсальность • простота перехода от одной задачи к другой • возможность моделирования по частям • экономичность • возможность применения ЭВМ	• сложность математического аппарата • трудность перевода с математического языка на реальный
СТРУКТУРНОЕ	• позволяет исследовать комплексное воздействие различных факторов на развитие объекта ; • дает возможность получения данных по большому числу показателей • дает возможность проведения многовариантных расчетов	• много времени на создание модели, формирование и обработку больших массивов исходной информации
ИМИТАЦИОННОЕ	• универсальность (для разных сфер) • наглядность (способность визуализировать процесс работы системы) • дает возможность избежать применения математических формул	• много времени на создание модели • точность уступает математическому моделированию • нет определенных стандартов

Продолжение Таблицы 2.1.

Моделирование	Достоинства	Недостатки
ФИЗИЧЕСКОЕ	• полное воспроизводство процесса; • – наглядность процесса; • – возможность регистрации наблюдений без преобразующих устройств; • – изучение явлений, не поддающихся математическому описанию.	• для исследования каждого нового процесса необходимо создавать новую модель; • – изменение параметров оригинала часто требует физической переделки или полной замены модели; • – высокая стоимость изготовления моделей сложных объектов;

Таким образом, методология научно-технического познания включает проблемы: соотношение технического эмпирического опыта и технической научной теории, в том числе ее специфики; моделирования технических объектов как процесса их познания и создания; методов технических исследований; критериев оценки технических объектов.

2.2. Моделирование фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме "звезда"

2.2.1. Схема и описание устройства

В данном параграфе был исследован ФРТ, реализованный по схеме "звезда", основными элементами которого стали два силовых трансформатора, один из них выполняет функции намагничивающего (или параллельного), другой – функции фазосдвигающего (или последовательного) элемента. На схеме рис.2.1 обмотки и соответствующие электрические величины, характеризующие режим намагничивающего трансформатора помечены индексом " p ", обмотки и электрические величины фазосдвигающего трансформатора - индексом " q ". Схемы электрических соединений устройства на стороне высокого напряжения отражены на рис.2.1а, на стороне низкого напряжения – на рис.2.1б.

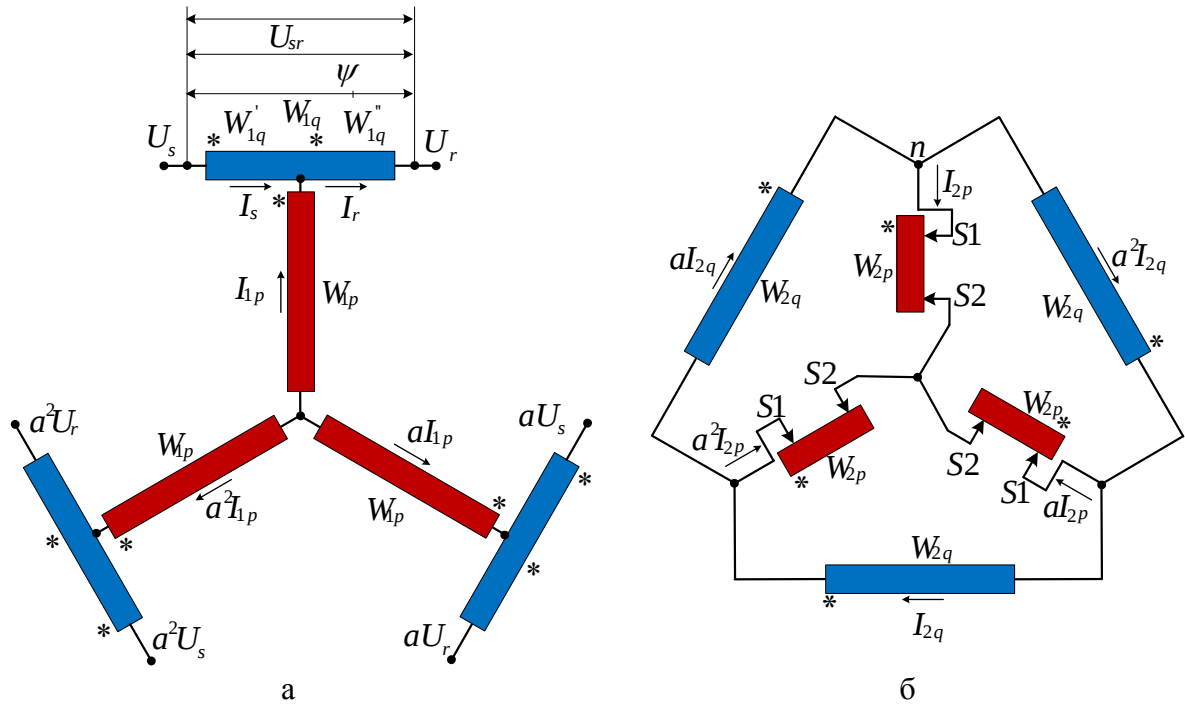


Рис.2.1. Схема фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме "звезда"

Регулирование фазового сдвига ψ выходного напряжения U_r относительно напряжения на входе U_s осуществлялось встречным перемещением контактов $S1, S2$ механизма переключения под нагрузкой по ответвлениям низковольтной регулировочной обмотки W_{2p} намагничивающего трансформатора. Высоковольтные обмотки фазосдвигающего трансформатора W_{1q} имеют средние точки, к которым были подключены высоковольтные выводы обмоток W_{1p} намагничивающего трансформатора.[14,16,18] Благодаря этому, была достигнута достаточно высокая стабильность выходного напряжения по величине в процессе регулирования угла ψ . Математическая модель объекта исследования была детально рассмотрена в [108].

2.2.2. Математическая модель устройства

При данных условиях уравнение электромагнитного баланса фазосдвигающего трансформатора было записано следующим образом:

$$I_s \frac{W_{1q}}{2} + I_r \frac{W_{1q}}{2} = I_{2q} W_{2q} \quad (2.1)$$

Тогда ток вторичной обмотки фазосдвигающего трансформатора, характеризуется соотношением:

$$I_{2q} = \frac{1}{2k_q} (I_s + I_r), \quad (2.2)$$

где коэффициент трансформации: $k_q = \frac{W_{2q}}{W_{1q}}$.

При равенстве модулей входного и выходного напряжений, как это имело место в рассмотренном случае, обеспечено и равенство модулей входного и выходного токов нагрузки. Указанные токи отличаются только по фазе, поэтому связь между токами I_s и I_r была описана следующим образом:

$$I_r = I_s e^{j\psi} \quad (2.3)$$

Тогда выражение для токов вторичной обмотки (2.2) фазорегулирующего трансформатора приобрело вид:

$$I_{2q} = \frac{1 + e^{j\psi}}{2k_q} I_s = \frac{1}{k_q} \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s \quad (2.4)$$

Модуль этого тока $|I_{2q}| = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s$

Здесь и в дальнейшем было учтено, что ток I_s совмещен с осью действительных значений. Это позволило выразить через него все токи в других элементах схемы фазорегулирующего трансформатора. Далее был определен характер изменения токов в обмотках намагничивающего трансформаторного элемента. Для узла "n" системы обмоток низкого напряжения:

$$aI_{2q} = I_{2p} + a^2 I_{2q} \quad (2.5)$$

или

$$I_{2p} = (a - a^2) I_{2q} = j\sqrt{3} I_{2q}.$$

С учетом ранее установленного соотношения для тока I_{2q} (2.4) получили:

$$I_{2p} = j \frac{\sqrt{3}}{k_q} \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s \quad (2.6)$$

Модуль этого тока изменялся в соответствии с равенством: $|I_{2p}| = \frac{\sqrt{3}}{k_q} \cos \frac{\psi}{2} I_s.$

Характер изменения тока I_{1p} в процессе регулирования угла ψ был определен из уравнения баланса токов для узла "m" схемы соединения высоковольтных обмоток:

$$I_{1p} = I_r - I_s = (e^{j\psi} - 1) I_s = j2 \sin \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s \quad (2.7)$$

Модуль этой величины имеет следующее выражение $|I_{1p}| = 2 \sin \frac{\psi}{2} I_s.$

Коэффициент трансформации намагничивающего трансформаторного элемента является переменной величиной, которая при изменении взаимного расположения

регулирующих контактов S_1 и S_2 может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Данная переменная величина представлена следующим образом:

$$k_{pf} = k_y k_p, \quad (2.8)$$

где: k_{pf} изменяющийся при регулировании коэффициент трансформации намагничивающего элемента,

$k_p = \frac{W_{2p}}{W_{1p}}$ полное соотношение числа витков вторичной обмотки этого элемента

относительно первичной,

k_y текущая координата управления, изменяющаяся в пределах от $k_y = -1$ до $k_y = 1$.

Тогда с учетом представленных выше значений токов I_{1p} и I_{2p} (2.6,2.7):

$$k_{pf} = k_y k_p = \frac{I_{1p}}{I_{2p}} = \frac{2 \sin \frac{\psi}{2}}{\sqrt{3} \cos \frac{\psi}{2}} k_q = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \operatorname{tg} \frac{\psi}{2},$$

$$\text{или} \quad \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{k_p}{k_q} k_y = \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} k_y \quad (2.9)$$

$$\text{где} \quad \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{k_p}{k_q}.$$

Данное соотношение (2.9) установило связь между k_q и k_p при заданных $\psi_{\max}$ и k_p и, таким образом, максимальный фазовый сдвиг определялся величинами k_p и k_q , а текущее значение угла ψ – значением k_y :

$$k_y = \frac{\operatorname{tg} \frac{\psi}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}} \quad (2.10)$$

Из рассмотренной схемы электрических соединений получены следующие уравнения связи между токами в элементах устройства:

$$\begin{aligned} I_{1p} &= I_r - I_s, & I_{2q} &= \frac{1}{2k_q} (I_s + I_r), \\ I_{2p} &= j\sqrt{3}I_{2q} = j\frac{\sqrt{3}}{2k_q} (I_s + I_r) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$I_{1p} = k_y k_p I_{2p} = jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} (I_s + I_r), \quad jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} (I_s + I_r) = I_r - I_s.$$

Последнее из этих уравнений дало возможность выразить закон преобразования фазы тока на выходе устройства (I_r) относительно тока на его входе (I_s):

$$I_r = \frac{1 + jk_y tg \frac{\psi_{max}}{2}}{1 - jk_y tg \frac{\psi_{max}}{2}} I_s = \dot{K} I_s \quad (2.12)$$

Комплексный коэффициент преобразования $\dot{K}$ из (2.12) был разделен на действительную и мнимую составляющие:

$$\dot{K} = \cos \psi + j \sin \psi = \frac{1 - k_y^2 t g^2 \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 + k_y^2 t g^2 \frac{\psi_{\max}}{2}} + j \frac{2 k_y t g \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 + k_y^2 t g^2 \frac{\psi_{\max}}{2}} \quad (2.13)$$

Мнимая составляющая ($j \sin \psi$) этого коэффициента является нечетной функцией угла ψ и была использована для определения связи между коэффициентом k_y и углом ψ :

$$\sin \psi = \frac{2k_y t g \frac{\psi_{max}}{2}}{1 + k_y^2 t g^2 \frac{\psi_{max}}{2}}.$$

Выражая это равенство относительно k_y , приходим к результату:

$$k_y = \frac{tg \frac{\psi}{2}}{tg \frac{\psi_{max}}{2}} \quad (2.14)$$

Этот результат (2.14) совпал с ранее полученным выражением связи между текущими значениями угла ψ и k_y (2.10), что подтвердило корректность выполненных преобразований. Выше отмечалось, что одна из особенностей трансформаторного фазорегулирующего устройства состоит в том, что закон преобразования токов, осуществляемый устройством, полностью соответствует закону преобразования напряжений. На рис.2.2 изображена векторная диаграмма напряжений, позволившая дать простейшее описание закона преобразования напряжений.

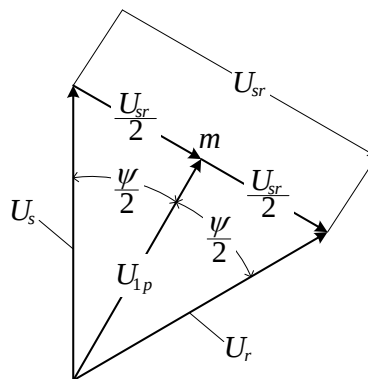


Рис.2.2. Векторная диаграмма напряжений

В соответствии с данной векторной диаграммой напряжение U_{1p} в точке "m" схемы соединения обмоток (рис.2.1) в процессе регулирования изменялось следующим образом:

$$U_{1p} = U_s \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} \quad (2.15)$$

Напряжение U_{2p} , представлено так:

$$U_{2p} = k_{pf} U_{1p} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_y k_q \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s \quad (2.16)$$

Значение $k_{pf} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_y k_q \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}$ получено ранее в (2.8) при рассмотрении связи между токами I_s и I_r . Зная U_{2p} , можно выразить значение U_{2q} :

$$U_{2q} = j\sqrt{3}U_{2p} = jk_y k_q \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s \quad (2.17)$$

С другой стороны

$$U_{2q} = k_q U_{sr},$$

где U_{sr} напряжение между соответствующими входными (U_s) и выходными (U_r) клеммами устройства. С учетом выше изложенного, напряжение U_{sr} приобрело вид:

$$U_{sr} = j2 \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} U_s \quad (2.18)$$

Из векторной диаграммы рис. 2.2 также следует: $U_s + U_r = 2 \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s$.

Тогда $U_{sr} = j(U_s + U_r) k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}$. В свою очередь $U_r = U_s + U_{sr} = U_s + j(U_s + U_r) k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}$

или $U_r - k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} U_r = U_s + jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} U_s$.

Выражая U_r через U_s , мы пришли к результату:

$$U_r = \frac{1 + jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 - jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}} U_s = \dot{K} U_s \quad (2.19)$$

Это означает, что коэффициент преобразования по току (2.12) полностью соответствует коэффициенту преобразования по напряжению (2.19). Выполненный анализ дал возможность представить следующие закономерности изменения токов и напряжений в элементах фазорегулирующего трансформатора:

для возбуждающего элемента:

$$I_{1p} = 2 \sin \frac{\psi}{2} I_s \quad U_{1p} = \cos \frac{\psi}{2} U_s \quad (2.20)$$

$$I_{2p} = \frac{\sqrt{3}}{k_q} \cos \frac{\psi}{2} I_s \quad U_{2p} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s$$

для фазосдвигающего элемента

$$\begin{aligned} I_{1q} &= I_s & U_{1q} &= 2 \sin \frac{\psi}{2} U_s \\ I_{2q} &= \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s & U_{2q} &= 2 k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Расчетная мощность каждого трансформаторного элемента определялась максимальными значениями токов и напряжений соответствующих обмоток. Для возбуждающего элемента, максимальное значение тока $I_{1p(max)}$ соответствовало максимальному значению угла ψ , а максимального значения тока $I_{2p(max)}$ имело место при $\psi = 0$. В то же время максимальное значение напряжения $U_{1p(max)}$ имело место при $\psi = 0$, а максимальное значение напряжения $U_{2p(max)}$ – при $\psi = \psi_{max}$. Отсюда расчетная мощность возбуждающего элемента S_p , была определена как полусумма расчетных мощностей обмоток:

$$S_p = \frac{U_{1p(max)} I_{1p(max)} + U_{2p(max)} I_{2p(max)}}{2} = \frac{2U_s I_s \sin \frac{\psi_{max}}{2} + 2U_s I_s \sin \frac{\psi_{max}}{2}}{2} = 2U_s I_s \sin \frac{\psi_{max}}{2} \quad (2.22)$$

Для фазосдвигающего элемента значение тока I_{1q} в процессе регулирования осталось неизменным $I_{1q} = I_{1q(max)} = I_s = const$. Напряжение U_{1q} достигло своего максимума (U_s) при максимальном значении угла ψ . Максимальное значение тока $I_{2q(max)}$ имело место при $\psi = 0$, а напряжение $U_{2q(max)}$ также достигало своего максимума (U_s) при $\psi = \psi_{max}$. При этом расчетная мощность фазосдвигающего элемента:

$$S_q = \frac{U_{1q(max)} I_{1q(max)} + U_{2q(max)} I_{2q(max)}}{2} = \frac{2U_s I_s \sin \frac{\psi_{max}}{2} + 2U_s I_s \sin \frac{\psi_{max}}{2}}{2} = 2U_s I_s \sin \frac{\psi_{max}}{2} \quad (2.23)$$

Полная расчетная мощность устройства ($S_{фРТ}$) является суммой расчетных мощностей его элементов

$$S_{фРТ} = S_p + S_q = 4U_s I_s \sin \frac{\psi_{max}}{2} \quad (2.24)$$

2.2.3. Определение технических характеристик устройства на основе применения структурно-имитационной модели

На основе принципиальной схемы рис.2.1 была создана комплексная модель устройства, позволившая провести различные расчетные эксперименты с измерением всех необходимых для анализа параметров во всех элементах устройства. Для удобства проведения расчетных экспериментов каждый из трансформаторов устройства был представлен в модели в виде группы однофазных трансформаторов. Параметры каждого элемента были определены исходя из $U_s = U_r = 230V$ и номинального тока нагрузки $I_r = 12A$. Регулирование фазового сдвига ψ выходного напряжения U_r относительно напряжения на входе U_s осуществлялось с помощью силовых ключей. На модели были проведены ряд расчетных экспериментов, таких как опыт холостого хода, короткого замыкания, а также нагрузочные испытания, которые позволили определить энергетические характеристики устройства (Приложение 1). Для проверки положений, изложенных в первом параграфе, автором исследования по результатам расчетных экспериментов были построены сравнительные характеристики рис.2.3-2.5.

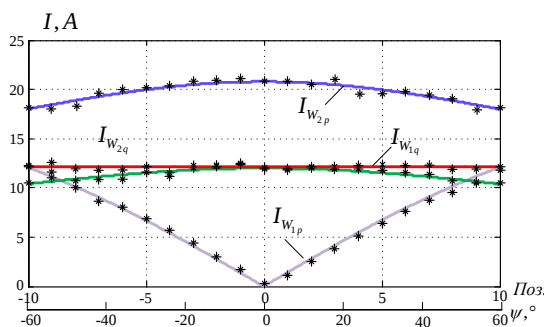


Рис.2.3. Характеристики токов в элементах устройства

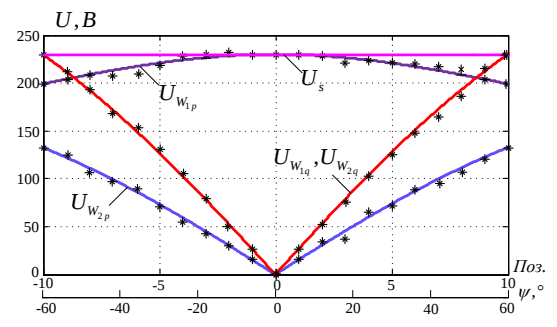


Рис.2.4. Характеристики напряжений на элементах устройства

На рисунках приведены зависимости токов и напряжений в элементах устройства, мощность устройства от независимой координаты управления k_y , рассчитанные по выведенным выражениям (в виде непрерывных линий), а также полученные в результате расчетных экспериментов на Simulink модели (в виде звездочек).

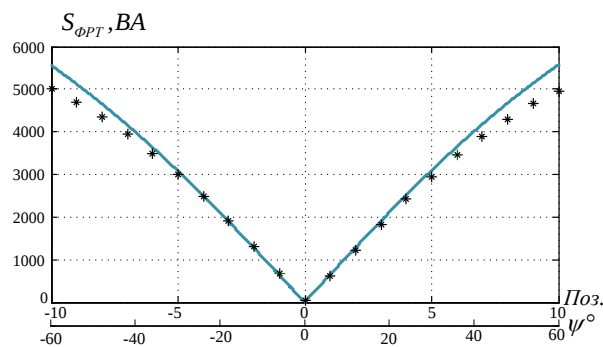


Рис.2.5. Характеристики мощности устройства

После анализа рис.2.3-2.5 можно констатировать совпадение результатов, полученных как при расчетах по математическим формулам, так и с помощью Simulink-модели.

2.3. Исследование характеристик "однотрансформаторного фазорегулирующего устройства с регулированием в нейтрали"

2.3.1. Схема и описание фазорегулирующего трансформатора

Рассмотренное в этом параграфе устройство представляет собой трехфазный трехобмоточный трансформатор (рис.2.6), содержащий трехфазные системы первичных (W_1) и вторичных (W_2) обмоток, а также трехфазную систему обмоток управления (W_3) с регулировочными ответвлениями, которые переключаются с помощью заземленных контактов (P) механизма переключения под нагрузкой. [1]

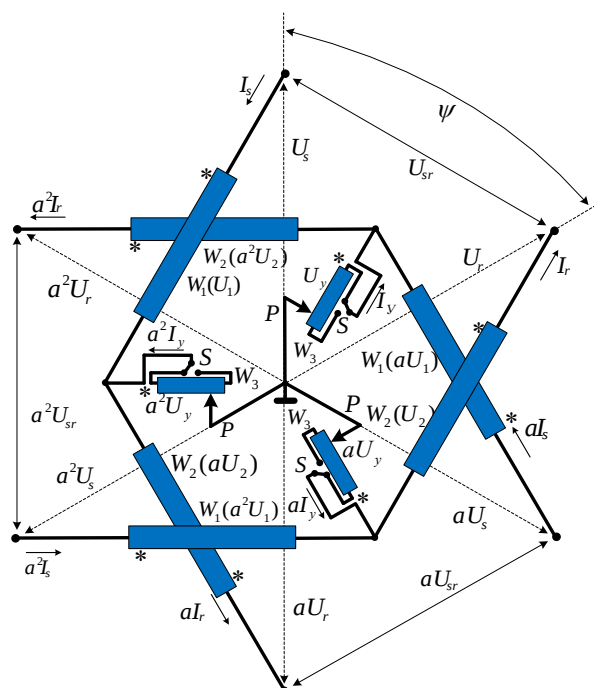


Рис.2.6. ФРТ, выполненный по "однотрансформаторной схеме с регулированием в нейтрали"

Если напряжение U_r опережало U_s , то фазовый сдвиг ψ читался положительным, в противном случае - отрицательным.

2.3.2. Математическая модель устройства

Математическая модель объекта исследования детально рассмотрена в [2,8].

Комплексный коэффициент преобразования фазорегулирующего трансформатора ($\dot{K}$)

характеризует его состояние при любом положении контактов механизма переключения (P) и полностью определяет соответствующий этому положению электрический режим.

В целях привязки режима к реальному состоянию устройства было введено понятие коэффициента управления k_y , который был выражен следующим образом:

$$k_y = \frac{W_3}{W_1} = \frac{W_3}{W_2}, \quad (2.25)$$

где значение W_3 – число действующих (т.е. обтекаемых током) витков этой обмотки при различных положениях механизма переключения P . Величина k_y представлена в качестве независимой координаты управления. Комплексный коэффициент преобразования по напряжению был определен, исходя из векторной диаграммы напряжений (рис.2.7).

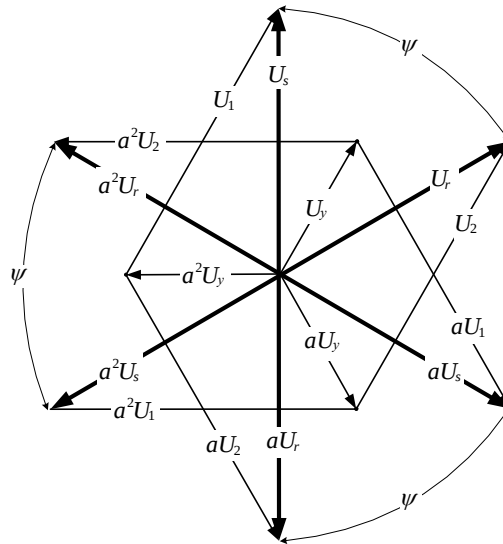


Рис.2.7. Векторная диаграмма напряжений

Учитывая, что $W_1 = W_2$, было записано: $U_1 = U_2 = U$. При этом напряжение U_y на обмотке управления подчиняется условию: $U_y = k_y \cdot U$. Из векторной диаграммы рис.2.7 следует:

$$\begin{cases} U_s = U_1 + a^2 U_y = (1 + a^2 k_y) U \\ U_r = U_2 + a U_y = (1 + a k_y) U \end{cases} \quad (2.26)$$

где a – комплексный оператор трехфазной системы $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Тогда:
$$\frac{U_s}{1 + a^2 k_y} = \frac{U_r}{1 + a k_y}, \quad \text{или} \quad U_r = \frac{1 + a k_y}{1 + a^2 k_y} U_s.$$

Сомножитель, стоящий перед напряжением U_s , для данного варианта фазорегулирующего трансформатора является его комплексным коэффициентом преобразования по напряжению:

$$\dot{K} = \frac{1 + a k_y}{1 + a^2 k_y} \quad (2.27)$$

При $k_y = 0$ получаем $\dot{K} = 1$. Это означает, что $U_s = U_r$, а угол $\psi = 0^\circ$.

При $k_y = 1$ получаем $K = \frac{1+a}{1+a^2} = a$. Это означает, что $U_s = aU_r$, а угол $\psi = 120^\circ$.

Далее, пренебрегая током холостого хода, был определен комплексный коэффициент преобразования по току нагрузки. Уравнение электромагнитного баланса (при условии, что $W_1 = W_2 = W$ и $W_y = k_y W$), приобрел вид: $k_y W I_3 + W I_r = W I_s$.

Отсюда было выражено значение I_y : $I_y = \frac{I_s - I_r}{k_y}$.

Для узла, к которому подтекает ток I_y , можно записать: $I_y + a I_s = a^2 I_r$ или $I_y = a^2 I_r - a I_s$.

При этих условиях было получено: $\frac{I_s - I_r}{k_y} = a^2 I_r - a I_s$.

Тогда: $(1 + a k_y) I_s = (1 + a^2 k_y) I_r$

В конечном счете, был получен результат:

$$I_r = \frac{1 + a k_y}{1 + a^2 k_y} I_s \quad (2.28)$$

Таким образом, коэффициент преобразования по току полностью соответствует коэффициенту преобразования по напряжению.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_r \\ I_r \end{array} \right\} = \dot{K} \cdot \left\{ \begin{array}{l} U_s \\ I_s \end{array} \right\}$$

При равенстве модулей входного и выходного напряжений, как это имело место в режиме холостого хода, получено:

$$\dot{K} = \frac{1 + a k_y}{1 + a^2 k_y} = e^{j\psi} = \cos \psi + j \sin \psi$$

Данное соотношение дало возможность выразить связь коэффициента управления k_y с тригонометрическими функциями, характеризующими регулируемый угол ψ :

$$\frac{1+a k_y}{1+a^2 k_y} = \frac{(1+a k_y)^2}{(1+a k_y)(1+a^2 k_y)} = \frac{(1-k_y - \frac{k_y^2}{2}) + j\sqrt{3}(1-\frac{k_y}{2})}{1-k_y + k_y^2} \quad (2.29)$$

При этом:

$$\cos \psi = \frac{1-k_y(1+\frac{k_y}{2})}{1-k_y + k_y^2}, \quad \sin \psi = \frac{\sqrt{3}(1-\frac{k_y}{2})k_y}{1-k_y + k_y^2}$$

Соотношения, выражающие связь между ψ и k_y применялись при решении вопросов управления режимом энергообмена между узлами электрической системы и были определены следующим образом:

$$\psi = 2 \arctg \frac{\sqrt{3}k_y}{2-k_y}, \quad k_y = \frac{2 \tg \frac{\psi}{2}}{\sqrt{3} + \tg \frac{\psi}{2}}$$

Основными показателями нормального режима работы устройства являются изменяющиеся в процессе регулирования угла ψ токи и напряжения в элементах электрической схемы. Характер изменения этих величин определяет энергетические и стоимостные характеристики устройства. Одним из таких показателей стало напряжение U_{sr} между входными и выходными клеммами устройства, Из схемы устройства рис.2.6 следует: $U_r = U_s + U_{sr}$. Тогда:

$$\begin{aligned} U_{sr} &= U_r - U_s = \frac{1+ak_y}{1+a^2k_y} U_s - U_s = \frac{(a-a^2)k_y}{1+a^2k_y} U_s = \frac{(a-a^2)(1+ak_y)k_y}{(1+a^2k_y)(1+ak_y)} U_s = \\ &= -\frac{3}{2} k_y \frac{k_y - j\frac{2}{\sqrt{3}}(1-\frac{k_y}{2})}{1-k_y + k_y^2} U_s \end{aligned}$$

Переходя к модулю этой комплексной величины, было получено: $|U_{sr}| = \frac{\sqrt{3}k_y}{\sqrt{1-k_y + k_y^2}} U_s$.

Учитывая ранее установленную связь между k_y и углом ψ , имеем: $|U_{sr}| = 2 \sin \frac{\psi}{2} U_s$.

Изменяющиеся при регулировании угла ψ напряжения обмоток W_1 и W_2 , выраженные в зависимости от коэффициента управления k_y подчиняются следующему закону:

$$|U_1| = |U_2| = U = \frac{\frac{k_y}{2} + \sqrt{1-k_y + \frac{k_y^2}{4}}}{\sqrt{1-k_y + k_y^2}} U_s.$$

Эти же напряжения, представленные через тригонометрические функции, были выражены следующим образом:

$$|U_1| = |U_2| = U = \left(\cos \frac{\psi}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\psi}{2} \right) U_s.$$

Соответственно напряжение на задействованной части обмотки управления U_y характеризуется соотношением:

$$|U_y| = \frac{k_y}{\sqrt{1 - k_y + k_y^2}} U_s$$

Что касается тока обмотки управления I_y , то характер его регулирования подчиняется следующим закономерностям:

-в зависимости от k_y

$$I_y = \frac{\frac{k_y}{2} + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}}}{\sqrt{1 - k_y + k_y^2}} I_s \quad (2.30)$$

-в зависимости от ψ

$$I_y = \left(\sqrt{3} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\psi}{2} \right) I_s \quad (2.31)$$

Согласно стандартному определению, расчетной мощностью трансформаторного устройства является полусумма максимальных мощностей всех его рабочих обмоток, для рассмотренного варианта фазорегулирующего трансформатора:

$$S_{PST} = \frac{|U_{smax}| |I_{smax}| + |U_{ymax}| |I_{ymax}| + |U_{rmax}| |I_{rmax}|}{2} \quad (2.32)$$

Используя полученные ранее соотношения:

$$S_{PST} = \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} k_y + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}} \right) \left(\frac{k_y}{2} + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}} \right)}{1 - k_y + k_y^2} U_s I_s,$$

или

$$S_{PST} = \left(1 + \sin \frac{\psi}{2} \right) \left(\cos \frac{\psi}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\psi}{2} \right) U_s I_s \quad (2.33)$$

Величина $U_s I_s$ характеризует мощность нагрузки, на которую был рассчитан фазорегулирующий трансформатор.

2.3.3. Модифицированная система управления устройством

На схеме рис.2.6 изображен вариант трехобмоточного фазорегулирующего трансформатора с регулированием в нейтрали. Недостаток схемы регулирования рассмотренного ФРТ состоит в том, что при переводе переключателя S в противоположное положение, пределы регулирования угла фазового сдвига существенно сокращаются. Вариант схемы, обеспечивающей симметрию регулирования угла ψ в той и другой области, представлены на рис.2.8, векторная диаграмма напряжений на рис.2.9.

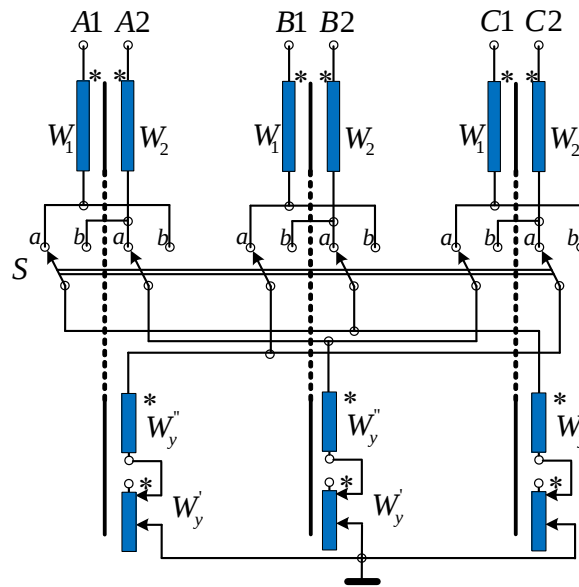


Рис.2.8. Схема регулирования угла ψ

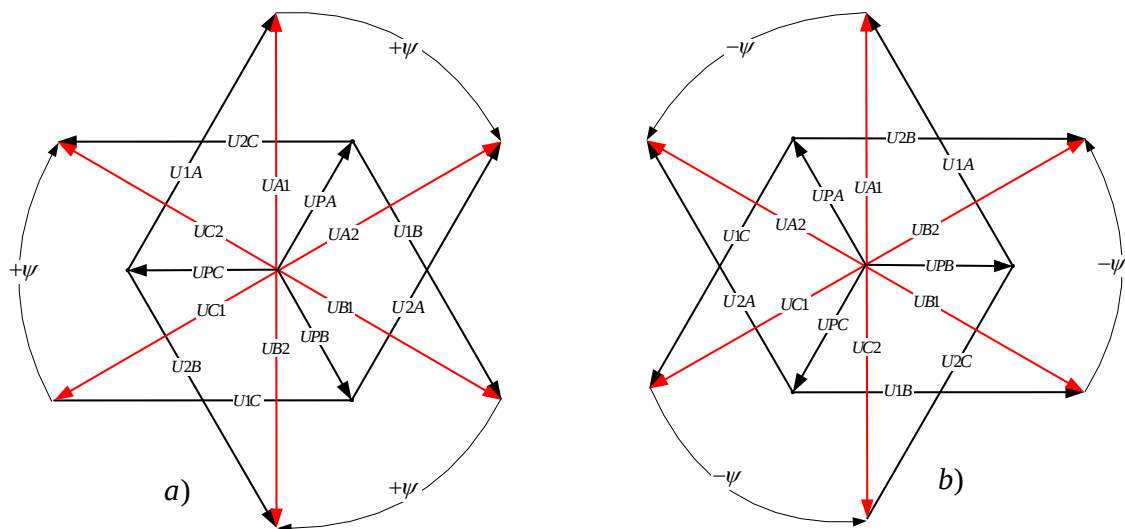


Рис.2.9. Векторные диаграммы напряжений при регулировании угла ψ в положительной области -(a), (b)-в отрицательной

Дополнительной особенностью схемы регулирования (рис.2.8) стало разделение обмотки управляющего фазорегулирующего трансформатора на регулируемую W'_y и нерегулируемую W''_y секции. Механизм переключения регулировочных ответвлений для данного варианта содержит два встречно переключаемых контакта. Это привело к существенному расширению пределов регулирования по углу ψ .

На рис.2.10 представлены графики изменения расчетной мощности фазорегулирующего трансформатора S_{PST} при изменении угла ψ в пределах $\pm 120^\circ$.

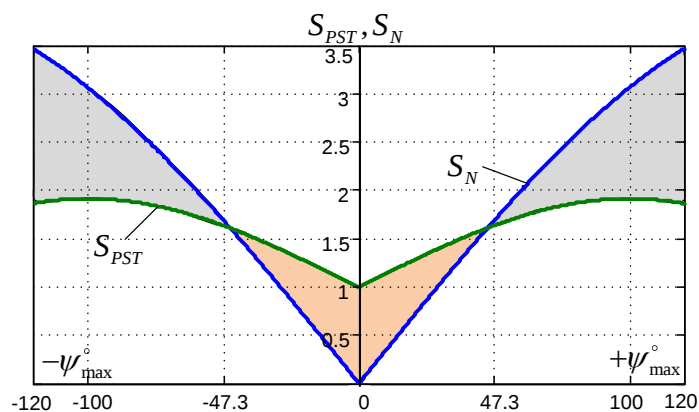


Рис.2.10. Графики изменения расчетной мощности фазорегулирующих устройств

Также, на рис.2.10 показаны графики изменения расчетной мощности S_N классического двухтрансформаторного варианта ФРТ. Анализ графиков $S_{PST}(\psi)$ и $S_N(\psi)$ доказывают эффективность применения фазорегулирующего трансформатора выполненного по схеме "однотрансформаторный с регулированием в нейтрали" в диапазоне более $\pm 50^\circ$.

2.3.4. Определение технических характеристик устройства на основе применения структурно-имитационного моделирования

На основе структурно-имитационной модели в среде Matlab/Simulink, для ФРТ (рис.2.6) были рассчитаны энергетические характеристики. На рис.2.11, для примера, представлены графики токов и напряжений в элементах устройства в режиме нагрузки. Линиями показаны характеристики, полученные на основе математической модели, а точками – при структурно-имитационном моделировании.

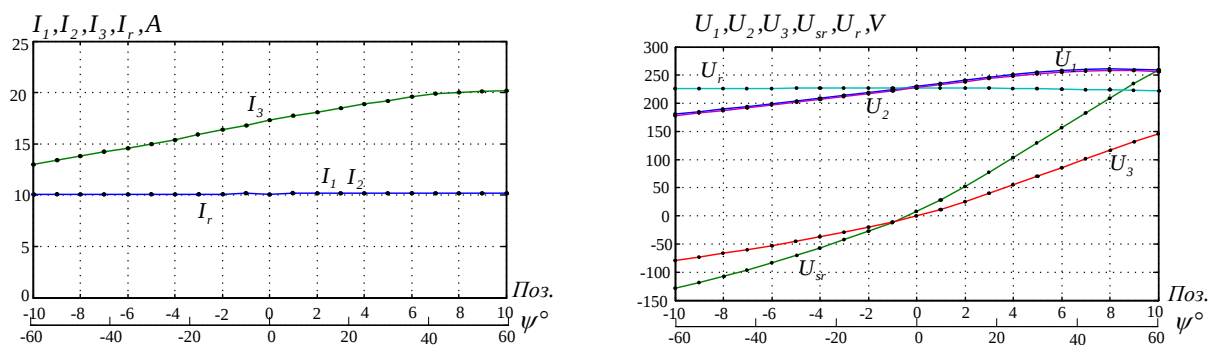


Рис.2.11. Графики токов и напряжений в элементах устройства, выполненного по схеме "однотрансформаторный с регулированием в нейтрали"

Результаты тестирования устройства в режимах холостого хода, короткого замыкания, а также в режиме нагрузки, позволившие определить характеристики устройства, приведены в (Приложении 2).

2.4. Фазорегулирующее устройство, выполненное по схеме "треугольник"

2.4.1. Общая характеристика объекта исследования

На рис.2.12 представлена схема рассмотренного в работе варианта фазорегулирующего устройства, выполненное по схеме "треугольник", с нанесенной на нее информацией по обмоткам и напряжениям в характерных точках [9]. На схеме рис.2.13 показано распределение токов по обмоткам устройства. Основными элементами устройства являются два силовых трансформатора, один из которых выполняет функции параллельного (или намагничивающего), другой – функции последовательного (или фазосдвигающего) элемента. Индексом "р" помечены обмотки и соответствующие электрические величины, характеризующие режим намагничивающего трансформатора, индексом "q" - обмотки и электрические величины фазосдвигающего трансформатора. Обмотка высокого напряжения фазосдвигающего трансформатора W_{1q} имеет среднюю точку "m", к которой подключены высоковольтные выводы обмоток W_{1p} намагничивающего трансформатора, соединенные в треугольник. Такой вариант включения способствовал стабильности выходного напряжения в процессе регулирования угла ψ .

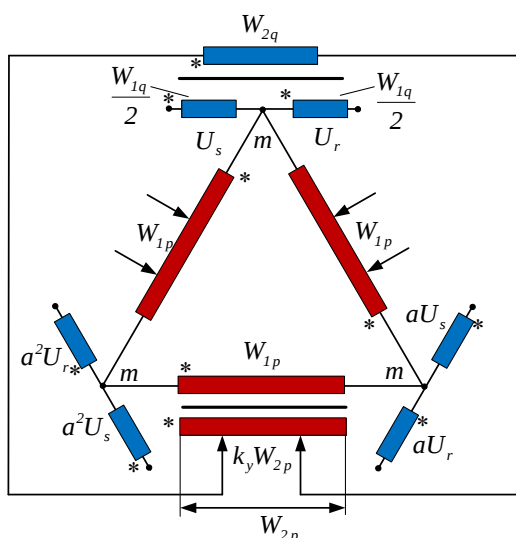


Рис.2.12. Схема ФРТ, выполненного по схеме "треугольник"

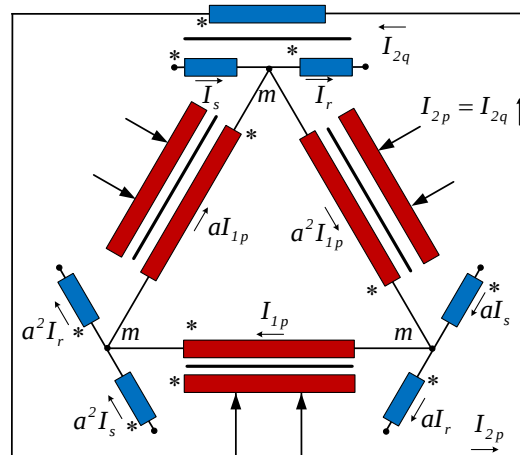


Рис.2.13. Распределение токов по обмоткам устройства

Изменение угла фазового сдвига между входом U_s и выходом U_r устройства осуществлялось путем взаимного перемещения регулировочных контактов на обмотке низкого напряжения W_{2p} .

2.4.2. Основные уравнения параметров режима

Исходя из рис.2.12,2.13 было записано уравнение электромагнитного баланса фазосдвигающего трансформатора:

$$I_s \frac{W_{1q}}{2} + I_r \frac{W_{1q}}{2} = I_{2q} W_{2q}. \quad (2.34)$$

Ток вторичной обмотки фазосдвигающего элемента согласно (2.34):

$$I_{2q} = \frac{I_s + I_r}{2k_q}, \quad (2.35)$$

где k_q коэффициент трансформации: $k_q = \frac{W_{2q}}{W_{1q}}.$

Токи на входе и выходе фазорегулирующего трансформатора равны между собой по модулю исходя из условия равенства модулей входного и выходного напряжений. Эти токи отличались только по фазе. Таким образом, связь между входным I_s и выходным I_r токами характеризуется следующим образом:

$$I_r = I_s e^{j\psi}. \quad (2.36)$$

Следовательно, выражение для токов вторичной обмотки (2.35) фазорегулирующего трансформатора:

$$I_{2q} = \frac{1 + e^{j\psi}}{2k_q} I_s \quad \text{или} \quad I_{2q} = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \quad (2.37)$$

Модуль тока во вторичной обмотке фазосдвигающего элемента, учитывая (2.37), было

описано соотношением:

$$|I_{2q}| = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s.$$

Для узла "m" системы обмоток высокого напряжения можно записать: $I_s + aI_{1p} = I_r + a^2 I_{1p}$

.

Отсюда, выражение для тока первичной обмотки намагничивающего элемента примет

вид: $I_{1p} = \frac{I_s - I_r}{a - a^2}, \quad \text{или} \quad I_{1p} = j \frac{I_s - I_r}{\sqrt{3}}.$

Указанные соотношения с учетом (2.36) было представлено следующим образом:

$$I_{1p} = j \frac{I_s - I_r}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \quad (2.38)$$

Соответственно ток I_{2p} во вторичной обмотке намагничивающего элемента, с учетом (2.35) и (2.37) определяется выражением:

$$I_{2p} = I_{2q} = \frac{I_s + I_r}{2k_q} = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \quad (2.39)$$

Коэффициент трансформации намагничивающего элемента (k_{pf}) был определен как:

$$k_{pf} = k_y k_p = \frac{I_{1p}}{I_{2p}} = j \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \frac{I_s - I_r}{I_s + I_r} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}. \quad (2.40)$$

Отсюда
$$\operatorname{tg} \frac{\psi}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{k_p}{k_q} k_y = k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}.$$

При $k_y = 1$ получаем:
$$\operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{k_p}{k_q} \quad \text{или} \quad k_p = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} \cdot k_q.$$

Из соотношения (2.40) также следует
$$j \frac{I_s - I_r}{I_s + I_r} = \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}.$$

Отсюда была получена связь между выходным I_r и входным I_s токами рассмотренного

устройства:
$$I_r = \frac{1 + jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 - jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}} I_s. \quad (2.41)$$

Величина $\dot{K}$ является комплексным коэффициентом преобразования как по току, так и по напряжению, что характерно для фазорегулирующего трансформатора

$$\dot{K} = \frac{1 + jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 - jk_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}} \quad (2.42)$$

Векторные диаграммы токов, поясняющие работу фазорегулирующего устройства, при характерных значениях углов фазового сдвига $\psi = 30^\circ$ и $\psi = 60^\circ$ приведены на рис.2.14,2.15 соответственно.

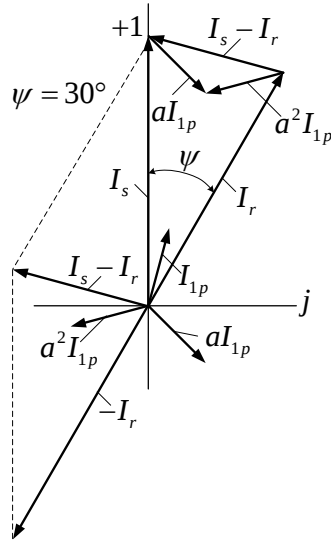


Рис.2.14. Векторная диаграмма токов при угле фазового сдвига $\psi = 30^\circ$

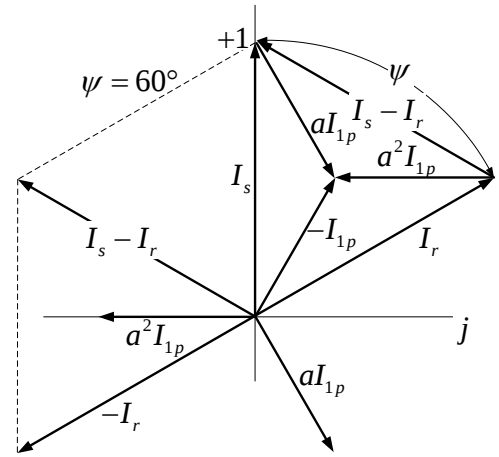


Рис.2.15. Векторная диаграмма токов при угле фазового сдвига $\psi = 60^\circ$

Далее был определен характер изменения напряжений на обмотках возбуждающего и фазосдвигающего элементов фазорегулирующего устройства. Напряжение в узле "m":

$$U_m = U_s \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} \quad (2.43)$$

С учетом (2.43) напряжение на первичной обмотке намагничивающего элемента:

$$U_{1p} = -j\sqrt{3}U_m = -j\sqrt{3} \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s, \quad (2.44)$$

а его модуль:

$$|U_{1p}| = \sqrt{3} \cos \frac{\psi}{2} U_s. \quad (2.45)$$

Напряжение на вторичной обмотке намагничивающего элемента:

$$U_{2p} = k_y k_p U_{1p} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \tan \frac{\psi}{2} U_{1p} = -j k_q \sin \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s. \quad (2.46)$$

Модули напряжений вторичных обмоток устройства и первичной обмотки фазосдвигающего элемента определены выражениями:

$$|U_{2p}| = 2k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s, \quad (2.47)$$

$$|U_{2q}| = |U_{2p}| = 2k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s, \quad (2.48)$$

$$|U_{1q}| = \frac{|U_{2q}|}{k_q} = 2 \sin \frac{\psi}{2} U_s. \quad (2.49)$$

Характер изменения модулей токов в обмотках

возбуждающего элемента:
$$|I_{1p}| = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \frac{\psi}{2} I_s, \quad |I_{2p}| = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s;$$

фазосдвигающего элемента:
$$|I_{1q}| = I_s, \quad |I_{2q}| = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s.$$

Для определения расчетной мощности ФРТ использованы максимальные значения модулей соответствующих токов и напряжений.

для возбуждающего элемента ФРТ:
$$S_p = \frac{|U_{1p(max)}| |I_{1p(max)}| + |U_{2p(max)}| |I_{2p(max)}|}{2},$$

для фазосдвигающего элемента:
$$S_q = \frac{|U_{1q(max)}| |I_{1q(max)}| + |U_{2q(max)}| |I_{2q(max)}|}{2}.$$

Полная расчетная мощность устройства ФРТ $S_{ФРТ} = S_p + S_q$ представляет собой сумму расчетных мощностей возбуждающего и фазосдвигающего элементов.

2.4.3. Определение технических характеристик устройства на основе применения структурно-имитационного моделирования

Для устройства, выполненного по схеме "треугольник" была создана структурно-имитационная модель ФРТ мощностью $S_{НОМ} = 2760 \text{ ВА}$, на напряжение $U_{НОМ} = 230 \text{ В}$ и номинальной токовой нагрузки устройства, равной 12 А , на базе которой были проведены расчетные эксперименты, позволившие оценить характер изменения режимных параметров устройства в процессе регулирования угла фазового сдвига ψ (Приложение 3). Исходные параметры модели были выбраны исходя из возможности построения лабораторного образца.

На рис.2.16 представлены графики токов и напряжений в элементах устройства в нагрузочном режиме. Линиями показаны характеристики, полученные на основе математической модели, а "звездочками" - при структурно-имитационном моделировании.

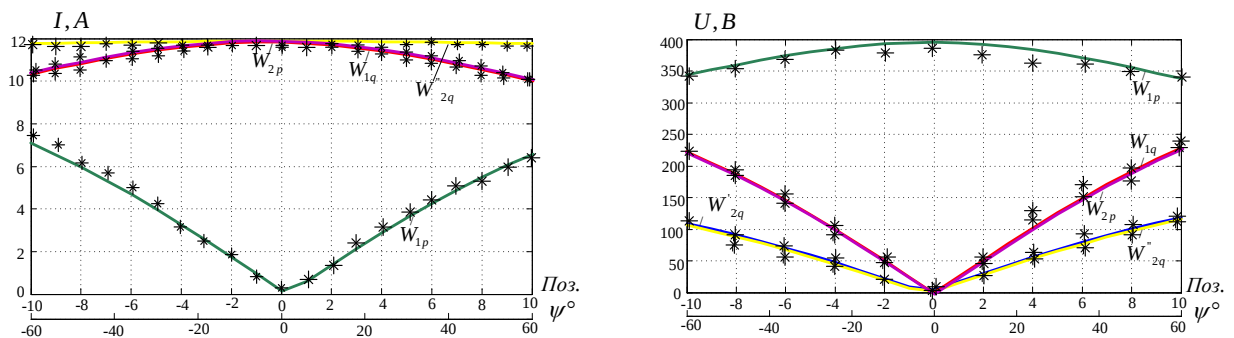


Рис.2.16. Графики токов и напряжений в элементах устройства, выполненного по схеме "треугольник"

Сравнительный анализ режимных характеристик объектов исследования, как при математическом, так и при структурно-имитационном моделировании, показал близость полученных результатов. Исходя из этого, было принято решение применить структурно-имитационное моделирование в качестве основного метода для исследования предложенных далее схемных вариантов ФРТ.

2.5. Выводы по второй главе

1. Предложен и описан методологический аппарат, применяемый для исследования новых схемных вариантов ФРТ. Определены правила и приемы, позволяющие получить объективные результаты и снизить риск ошибочных и непроизводительных действий.

2. Предложены три новых схемных варианта ФРТ "звезда", "однотрансформаторный", "треугольник", для которых созданы математические модели, позволившие определить соотношения между режимными параметрами в процессе регулирования угла фазового сдвига.

3. В среде Matlab/Simulink созданы имитационно-структурные SPS - модели объектов исследования при регулировании угла в диапазоне $\psi = 0 \div \pm 60^\circ$.

4. На основе SPS моделей выполнены расчетные эксперименты, результаты которых позволили проанализировать изменение параметров схемы замещения ФРТ в процессе изменения угла. Рассчитаны и проанализированы нагрузочные режимы работы устройств. По результатам расчетных экспериментов определены энергетические характеристики ФРТ, позволяющие сравнивать такого рода оборудования по выбранным критериям.

5. Проведен сравнительный анализ режимных характеристик объектов исследования полученных как при математическом, так и при структурно-имитационном моделировании, который показал близость полученных результатов. Принято решение применить структурно-имитационное моделирование в качестве основного метода для исследования предлагаемых далее схемных вариантов ФРТ.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИЧЕСКИХ ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

3.1. Схемы регулирования угла фазового сдвига и законы управления силовыми ключами

Применение быстродействующего управления, обеспечиваемого силовыми ключами, дает ряд преимуществ, позволяющих использовать фазорегулирующие устройства в качестве активных элементов современных Smart Grid систем. В связи с этим принято решение разработать схемы и законы управления фазовым сдвигом на основе средств силовой электроники для обеспечения требуемой дискретности шага регулирования.

В зависимости от требований, предъявляемых к фазорегулирующему трансформатору, с точки зрения точности регулирования угла выходного напряжения, предложены несколько возможных схем обмоток управления, основанных на переключении с помощью средств силовой электроники. Соответственно для каждой схемы управления были предложены законы управления, которые позволили обеспечить необходимый диапазон регулирования угла фазового сдвига.

Схема обмотки и закон управления на 7 ступеней регулирования, приведены на рис.3.1, 3.2 соответственно.

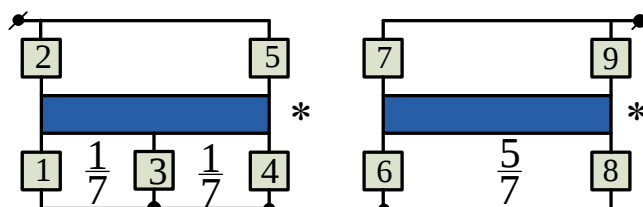


Рис.3.1. Схема обмотки управления, коммутируемая силовыми ключами на 7 ступеней регулирования

Ключи	1	●					●					●						
	2				●	●				●	●					●	●	
	3		●		●			●		●			●		●			
	4			●		●			●		●			●			●	
	5	●	●	●			●	●	●			●	●	●				
	6												●	●	●	●	●	
	7	●	●	●	●	●												
	8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●							
	9						●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7			
Степень регулирования																		

Рис.3.2. Закон управления силовыми ключами

Схема обмотки управления, предложенная для реализации на 10 позиций переключения, коммутируемой ключами, приведена на рис.3.3

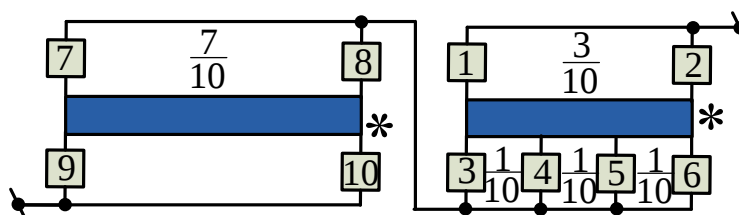


Рис.3.3. Схема обмотки управления, коммутируемой силовыми ключами

Закон управления силовых ключей был разработан для обеспечения регулирования угла фазового сдвига.

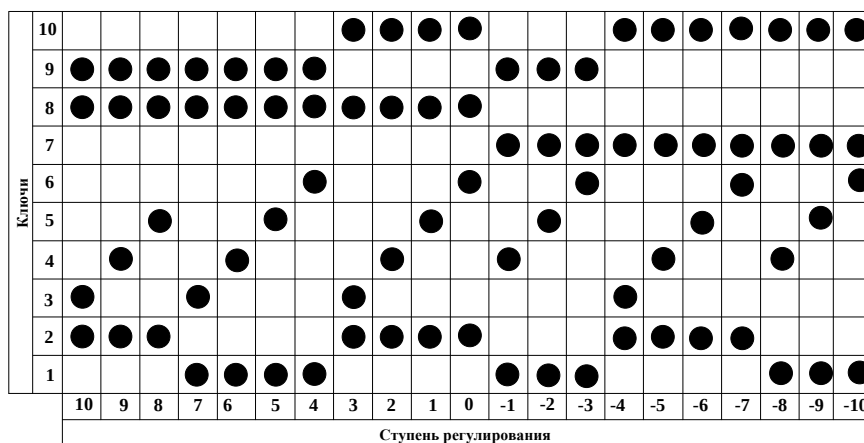


Рис.3.4. Закон переключения силовых ключей

Схема обмотки и закон управления, для 12 ступеней регулирования приведены на рис.3.5,3.6 соответственно.

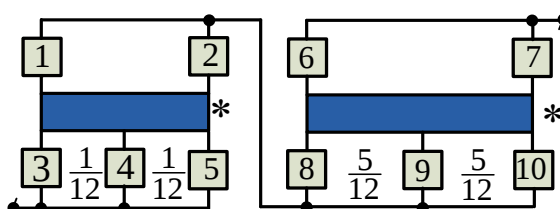


Рис.3.5. Схема обмотки управления, коммутируемая силовыми ключами

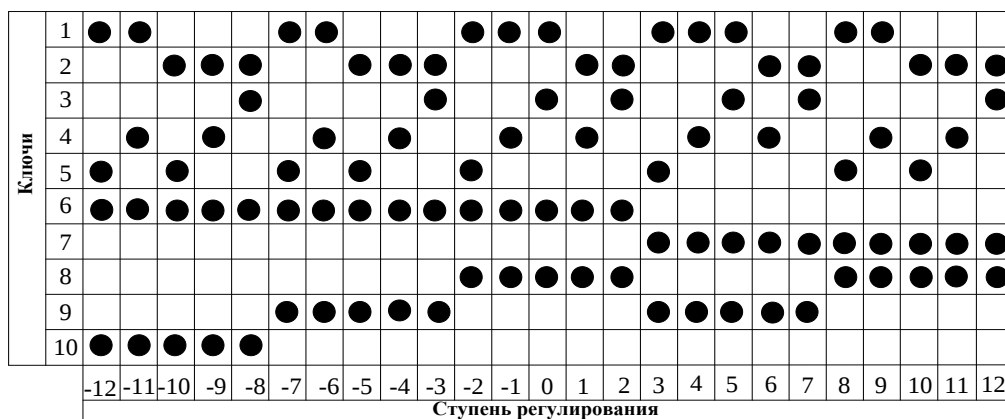


Рис.3.6. Закон переключения силовыми ключами

Схема обмотки и закон управления на 15 ступеней регулирования, приведены на рис.3.7, 3.8 соответственно.

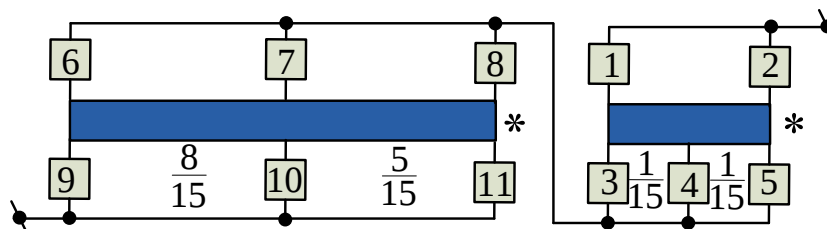


Рис.3.7. Схема обмотки управления, коммутируемая силовыми ключами



Рис.3.8. Закон управления силовыми ключами

Рассмотренные выше схемы и законы управления обмотками были использованы для проведения расчетных экспериментов с предложенными схемами статических трансформаторных устройств и при определении их энергетических характеристик.

3.2. Исследование характеристик фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме "модифицированный треугольник"

Принципиальная схема исследованного в работе варианта фазорегулирующего устройства, представлена на рис.3.9 Устройство подробно рассмотрено в [153].

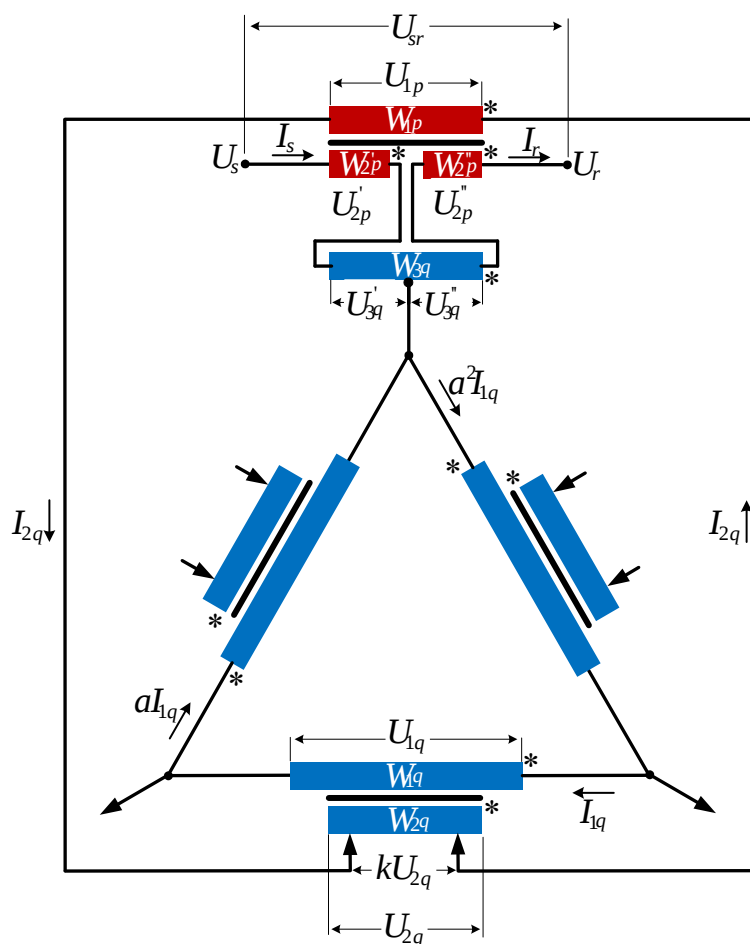


Рис.3.9. Схема ФРТ по схеме "модифицированный треугольник" с обозначением обмоток, напряжениями в характерных точках и распределением токов по обмоткам устройства

Для обеспечения регулирования угла фазового сдвига в диапазоне от 0° до 60° был разработан закон управления силовыми ключами, представленный на рис.3.6. Схема обмотки управления, приведена на рис.3.5.

Благодаря модификации схемы устройства мощность управления была уменьшена примерно в два раза. Это стало возможным за счет применения смешанных схем управления автотрансформаторной и трансформаторной

Испытания исследуемого ФРТ в режимах холостого хода и короткого замыкания (Приложение 4) позволили определить энергетические характеристики устройства в процессе регулирования. Характеристики активной и реактивной составляющих сопротивления холостого хода и короткого замыкания приведены соответственно на рис.3.10,3.11.

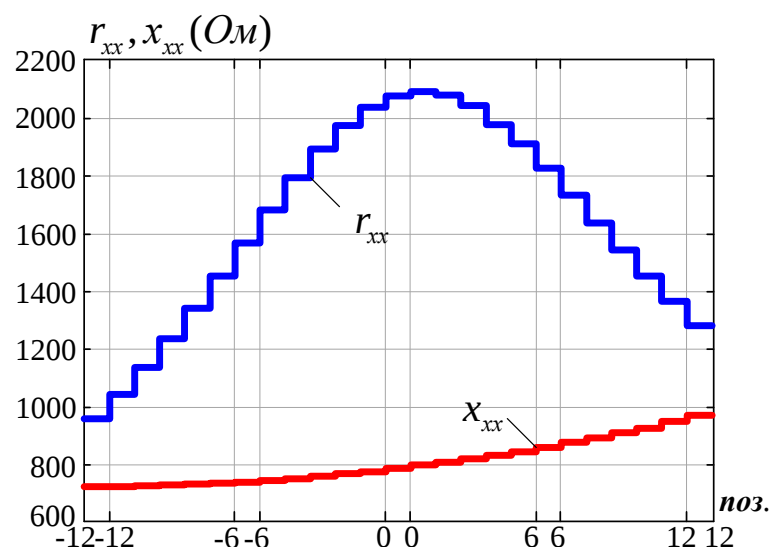


Рис.3.10. Характеристики активной r_{xx} и реактивной x_{xx} составляющих сопротивления холостого хода

Из рис.3.10. видно, как, ступенчато, изменяются зависимости активной и реактивной составляющей сопротивления ФРТ в режиме холостого хода. При изменении позиции - меняется угол фазового сдвига. Активная составляющая сопротивления ФРТ имеет максимум, при угле фазового сдвига около 30° . Минимальные значения активная составляющая ФРТ принимает при угле фазового сдвига равном 0° и 60° . Реактивная составляющая сопротивления ФРТ имеет минимум при угле фазового сдвига 0° , а максимум – при 60° .

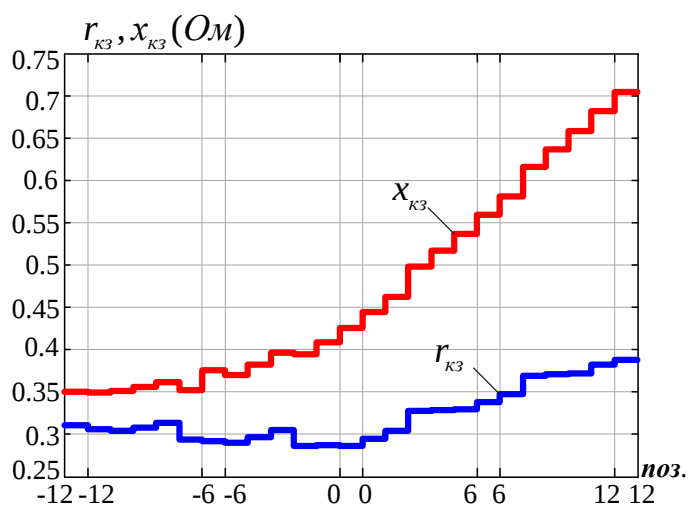


Рис.3.11. Характеристики активной r_{kz} и реактивной x_{kz} составляющих сопротивления короткого замыкания

Были проанализированы характеристики реактивной и активной составляющих сопротивления короткого замыкания, и определено, что активная составляющая

сопротивления $r_{кз}$ практически в 2 раза меньше реактивной составляющей $x_{кз}$ при опыте короткого замыкания.

Было отмечено, что при увеличении угла фазового сдвига, увеличивалось сопротивление устройства. В этом случае напряжение ФРТ уменьшалось.

На рис.3.12 представлены характеристики потерь активной мощности в ФРТ.

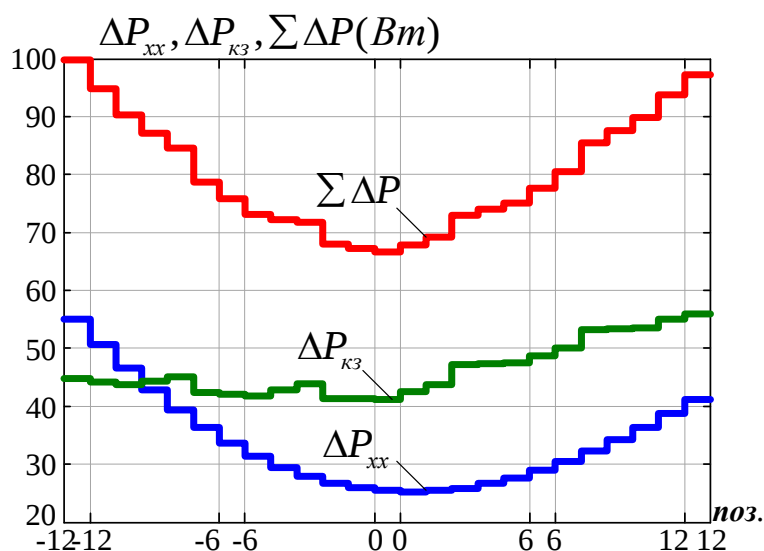


Рис.3.12. Зависимости изменения активных потерь от позиции переключения

где $\Delta P_{кз}$ - потери холостого хода;

$\Delta P_{хх}$ - потери короткого замыкания;

$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{кз} + \Delta P_{хх}$ - суммарные потери.

Исходя из полученных зависимостей, было отмечено, что при минимальных активных потерях в ФРТ угол фазового сдвига должен примерно равняться 30° , а при максимальных – либо 0° , либо 60° .

В процессе исследований также были проведены испытания ФРТ при работе на активную нагрузку (Приложение 4) при соблюдении условия $I_r = 12A = const$. Графики изменения напряжений и токов в процессе регулирования угла фазового сдвига (позиции) приведены соответственно на рис.3.13,3.14.

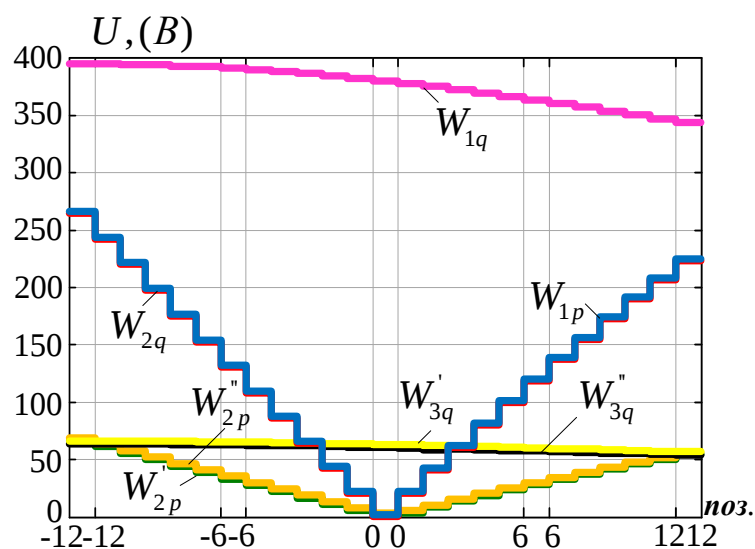


Рис.3.13. График изменения напряжения в элементах ФРТ

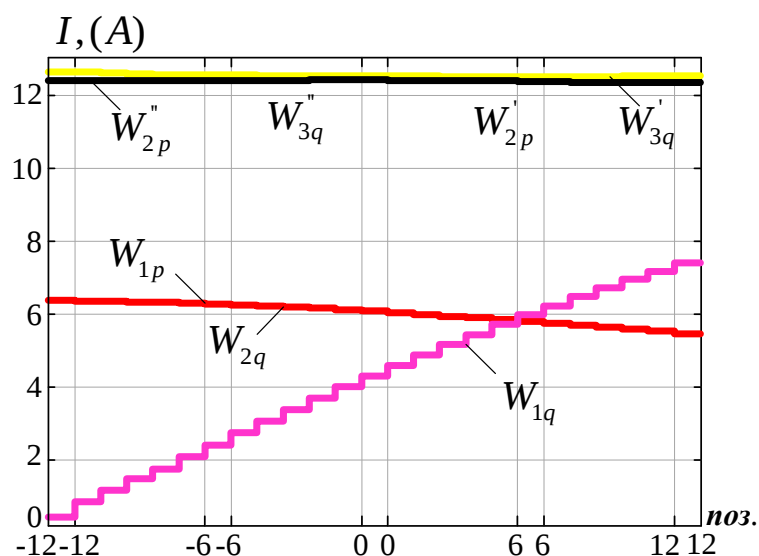


Рис.3.14. График изменения токов в элементах ФРТ

На обмотках W_{2p}' и W_{2p}'' намагничивающего трансформатора напряжения приблизительно были равны между собой. Та же ситуация прослеживалась между обмотками W_{3q}' и W_{3q}'' фазосдвигающего трансформатора. На обмотках W_{1p} и W_{2q} значения напряжений приблизительно были равны между собой. Максимальные значения напряжения на обмотках W_{1p} , W_{2q} , W_{2p}' , W_{2p}'' наблюдались при углах фазового сдвига, равных 0° и 60° . Но на обмотках W_{1q} , W_{3q}' , W_{3q}'' максимальное значение напряжения было при угле 0° .

Наиболее весомые изменения были видны на высоковольтном выводе обмотки W_{1q} фазовращающего трансформатора. В общем случае, напряжение на обмотке W_{1q} в 2-4 раза превышало значение напряжений на остальных обмотках ФРТ.

3.3. Исследование характеристик фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме "инвертированный многоугольник"

Принципиальная схема предложенного в работе, оригинального фазорегулирующего устройства, представлена на рис.3.15.

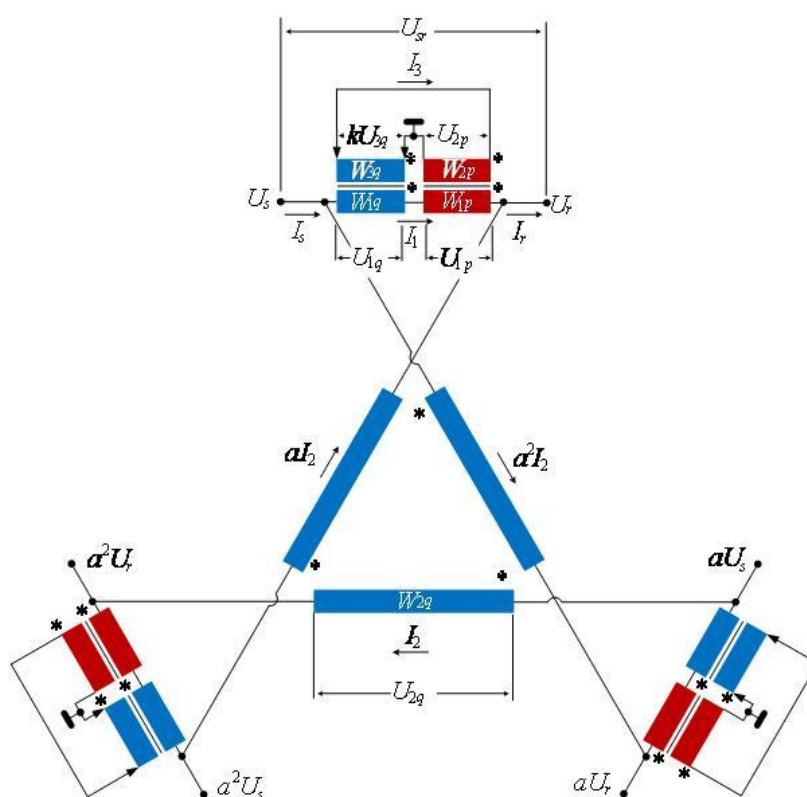


Рис.3.15. Принципиальная схема ФРТ, выполненного по схеме "инвертированный многоугольник"

Для обеспечения регулирования угла фазового сдвига в диапазоне от 0° до 60° был разработан закон управления силовыми ключами, представленный на рис.3.8. Схема обмотки управления, коммутируемая силовыми ключами, приведена на рис.3.7. В устройстве оптимизирована система управления углом фазового сдвига. Управление осуществляется на $\frac{1}{2}$ обмотки (т.е. в 2 раза уменьшено количество положений).

Для определения энергетических характеристик ФРТ, в среде Matlab/Simulink была создана SPS – модель и проведены исследования ФРТ на опытах холостого хода, короткого замыкания и при нагрузке (Приложение 5).

На рис.3.16 представлены зависимости сопротивлений холостого хода от ступени регулирования (угла фазового сдвига). Характеристики активной r_{xx} и реактивной x_{xx} составляющих сопротивления короткого замыкания устройства $Z_{кз}$, представлены на рисунке 3.17.

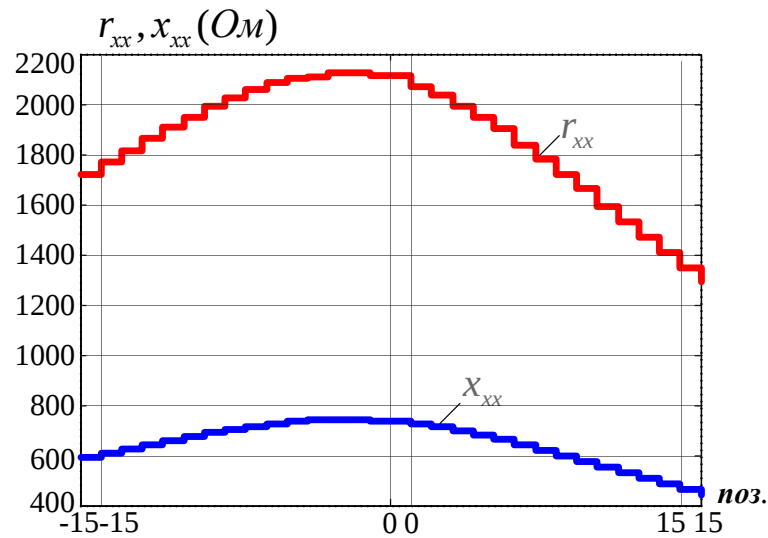


Рис.3.16. Характеристики активной r_{xx} и реактивной x_{xx} составляющих сопротивления ФРТ в режиме холостого хода

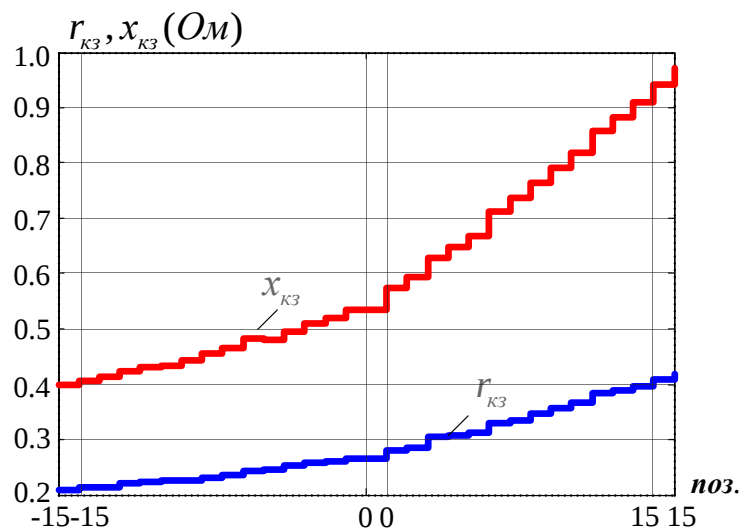


Рис.3.17. Характеристики активной $r_{кз}$ и реактивной $x_{кз}$ составляющих сопротивления короткого замыкания ФРТ

При регулировании позиции изменялся угол фазового сдвига. Следовательно, чем больше был угол (как в положительную сторону, так и в отрицательную по модулю), тем ниже становилось сопротивление трансформатора.

В этом случае напряжение устройства росло, и наоборот, чем было ближе позиция к 0, тем выше было активное и реактивное сопротивление ФРТ.

Эквивалентная зависимость ΔP определялась как результат суммы активных потерь в режиме холостого хода и короткого замыкания (рис.3.18). Видно, что потери более активно растут с позиции 5 и далее.

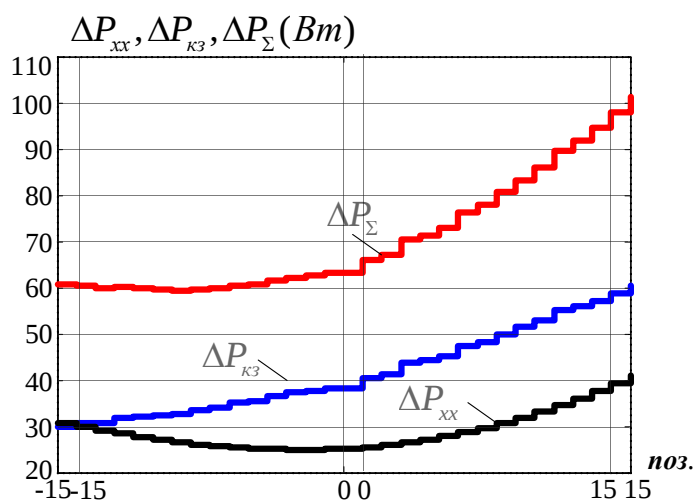


Рис.3.18. Зависимости изменения активных потерь от позиции

На рис.3.19 можно заметить, как изменяется напряжения на обмотках ФРТ в режиме нагрузочных испытаний. Видно, что самые большие значения напряжения принадлежат обмотке W_{2q} , т.е. выше других примерно в два раза. Значения напряжения на обмотках W_{2p}, W_{3q} практически равны.

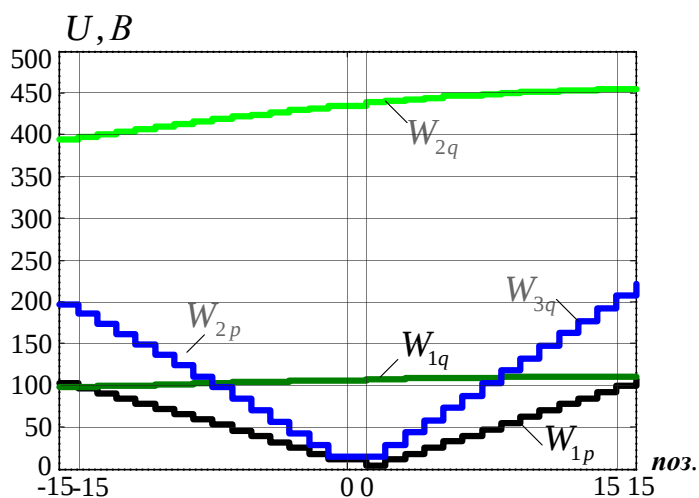


Рис.3.19. Кривые напряжений на обмотках ФРТ в режиме нагрузочных испытаний

Графики токов в обмотках устройства, реализованного по схеме "инвертированный многоугольник" в нагрузочном режиме представлены на рис.3.20.

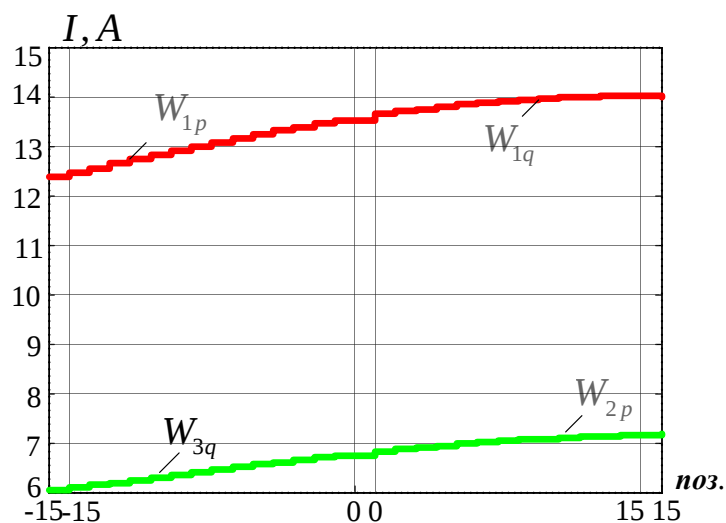


Рис.3.20. Зависимости токов в режиме нагрузочных испытаний при регулировании угла фазового сдвига (позиции)

При изучении характеристик изменения токов (рис.3.20), видно, что токи на обмотках ФРТ близки для обмоток W_{1p}, W_{1q} и обмоток W_{3p}, W_{2p} .

3.4. Исследование фазорегулирующего устройства, выполненного на основе схемы "модифицированный многоугольник"

Принципиальная схема исследованного в работе варианта фазорегулирующего устройства, представлена на рис.3.21. Устройство подробно рассмотрено в [20].

Изменение угла фазового сдвига между входом U_s и выходом U_r устройства было реализовано путем взаимного перемещения регулировочных контактов на обмотке W_{3q} .

Для обеспечения регулирования угла фазового сдвига в диапазоне от 0° до 60° был разработан закон управления силовыми ключами, представленный на рис.3.4. Схема обмотки управления, приведена на рис.3.3.

По результатам расчетных экспериментов, выполненных в среде Matlab/Simulink (Приложение 6), были получены энергетические характеристики ФРТ в процессе регулирования угла фазового сдвига ψ , значения которого определялось соответствующим положением силовых ключей, согласно закону переключения.

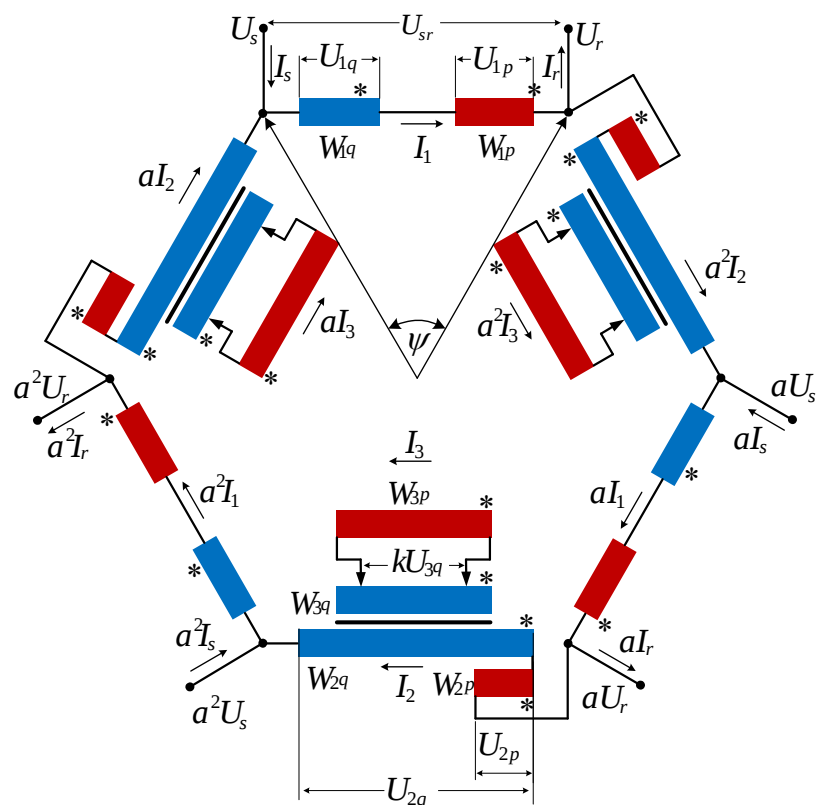


Рис.3.21. Принципиальная схема фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме "модифицированный многоугольник"

Параметры устройства, определенные в результате опыта холостого хода представлены на рис.3.22. Характеристики активной $r_{кз}$ и реактивной $x_{кз}$ составляющих сопротивления короткого замыкания устройства $Z_{кз}$, представлены на рис.3.23.

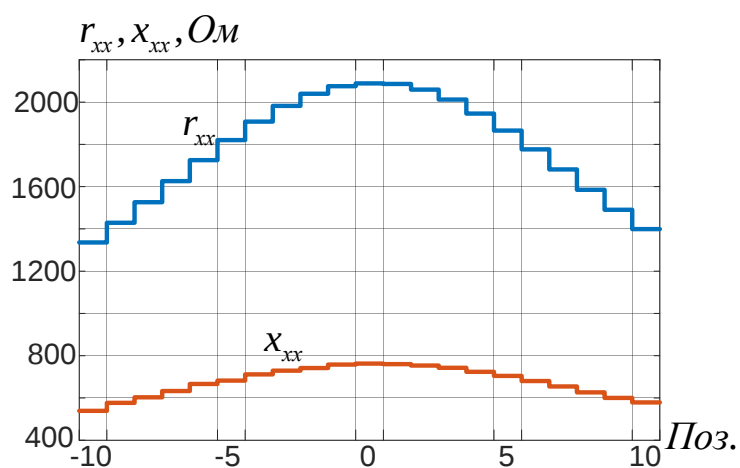


Рис.3.22. Характеристики активной r_{xx} и реактивной x_{xx} составляющих сопротивления Z_{xx} ФРТ в режиме холостого хода

Анализ зависимостей рис.3.22 показал, что графики имеют максимальные значения при фазовом сдвиге $\psi = 30^\circ$ (нулевая позиция) и симметрично снижаются в процессе, как уменьшения, так и увеличения угла.

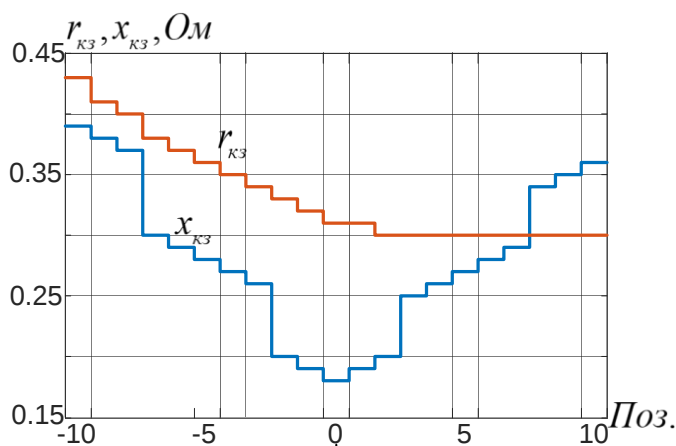


Рис.3.23. Характеристики активной r_{k3} и реактивной x_{k3} составляющих сопротивления короткого замыкания Z_{k3} ФРТ

Оценивая полученные кривые (рис.3.23) был сделан вывод, что активная составляющая сопротивления короткого замыкания спадает по экспоненте при увеличении угла ψ , а минимальное значение реактивной составляющей приходилось на угол $\psi = 30^\circ$, максимальные же значения наблюдались на границах диапазона регулирования. В процессе исследования устройства по схеме "модифицированного многоугольника", были проведены нагрузочные испытания с целью определения мощности всех элементов, входящих в его состав. Нагрузка при проведении эксперимента моделировалась активным сопротивлением $R_n = 19.1 \text{ Ом}$, обеспечивающим номинальный ток $I_r = 12 \text{ А}$. Характеристики изменения напряжений обмоток намагничивающего и фазосдвигающего трансформатора в процессе регулирования представлены на рис.3.24.

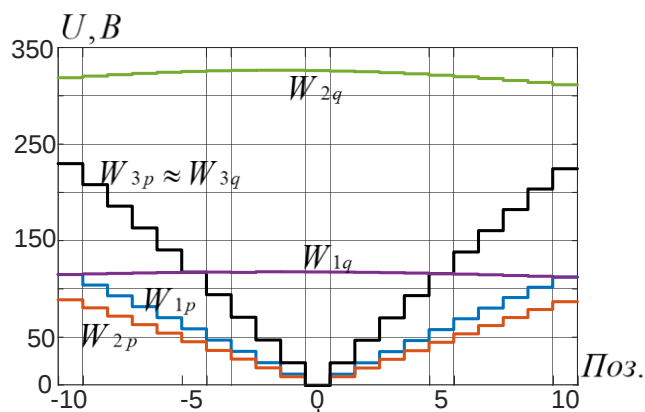


Рис.3.24. Зависимости изменения напряжений на обмотках ФРТ

Графики изменения токов в обмотках устройства приведены на рис.3.25.

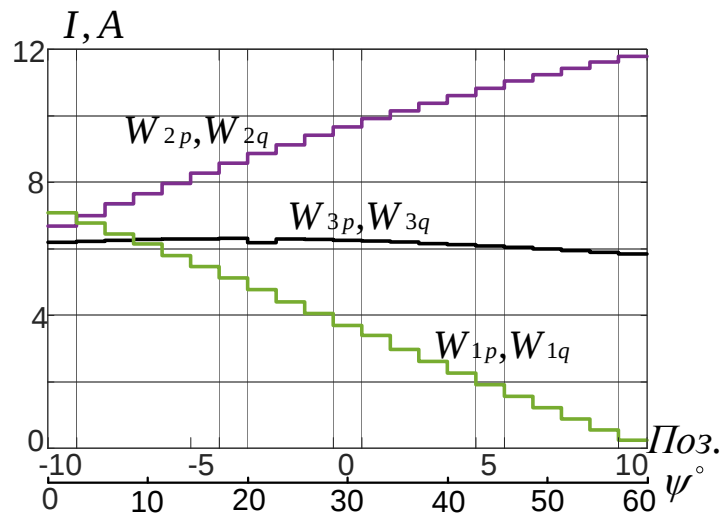


Рис.3.25. Зависимости изменения токов в режиме нагрузочных испытаний при регулировании угла фазового сдвига

Как видно из рис.3.24, напряжения на обмотках W_{2q} и W_{1q} в процессе регулирования угла практически не изменялись. Напряжение на остальных обмотках устройства менялось симметрично, принимая минимальные значения при $\psi = 30^\circ$ и максимальные значения при $\psi = 0^\circ$ и $\psi = 60^\circ$.

Анализ представленных графиков (рис.3.25) показал, что ток в обмотках W_{3p} и W_{3q} практически не менялся в процессе регулирования. При $\psi = 0^\circ$ токи в обмотках W_{2p} , W_{2q} и W_{1p} , W_{1q} приблизительно равны. При значении $\psi = 60^\circ$ в обмотках W_{2p} и W_{2q} ток достигал своего максимального значения, а в обмотках W_{1p} и W_{1q} - минимального.

На рис.3.26. приведены характеристики изменения потерь активной мощности, полученные в результате опытов холостого хода и короткого замыкания. Максимальные значения активных потерь имели место на границах диапазона регулирования.

В предложенном схемном варианте фазорегулирующего устройства, выполненном по схеме "модифицированный многоугольник", за счет подключения дополнительной обмотки W_{2p} намагничивающего трансформатора встречно с обмоткой W_{2q} фазосдвигающего трансформатора, обеспечена возможность снижения величины магнитной индукции в стержне, а также повышение ее стабильности в процессе регулирования угла фазового сдвига.

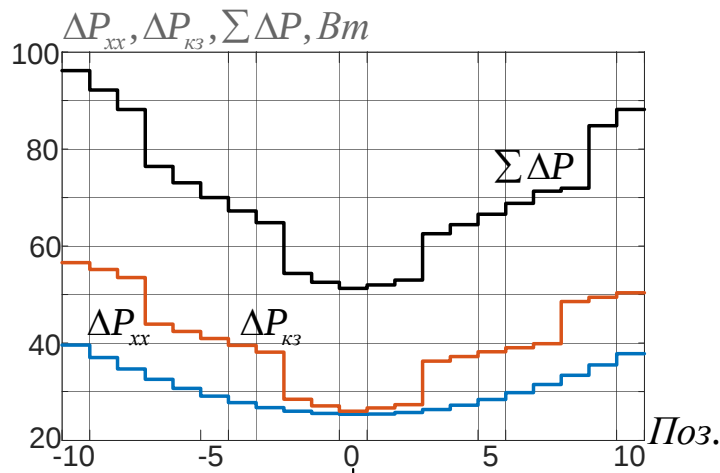


Рис.3.26. Зависимости изменения активных потерь в ФРТ выполненного по схеме "модифицированный многоугольник"

Предложенное техническое решение обеспечивает снижение установленной мощности оборудования, что, в свою очередь, приводит к снижению массогабаритных показателей устройства и, как следствие, его стоимости.

3.5. Исследование характеристик фазорегулирующего устройства, реализованного в "гексагональной" конфигурации

В этом параграфе рассмотрен оригинальный вариант ФРТ, выполненный в "гексагональной" конфигурации, принципиальная схема которого представлена на рис.3.27.

Основными частями ФРТ являются параллельный трансформатор (его обмотки помечены индексом "р"), и последовательный трансформатор (обмотки помечены индексом "q"). Входные электрические величины помечены индексом "s", выходные - индексом "r".

Схема обмотки управления W_{2q} при использовании силовых ключей приведена на рис.3.1. Благодаря модификации предложенного ФРТ мощность управления уменьшена примерно в два раза. Это стало возможным за счет применения смешанных схем управления автотрансформаторной и трансформаторной.

Регулирование угла фазового сдвига ψ между выходным U_r и входным напряжением U_s осуществлялось путём изменения состояний силовых ключей, согласно закону управления (рис.3.2), обеспечивающему диапазон изменения угла $\psi = 0^\circ \div 60^\circ$.

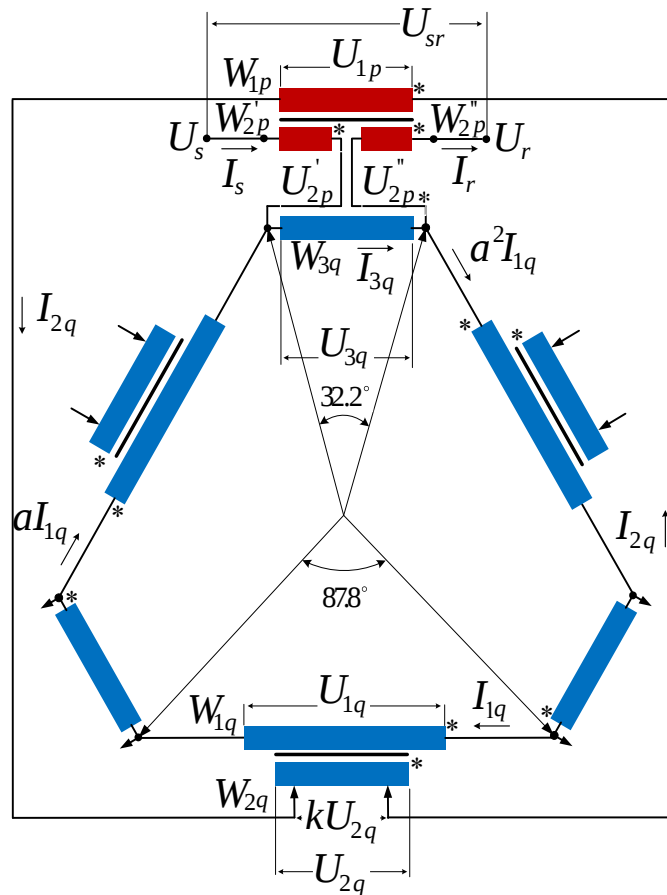


Рис.3.27. Принципиальная схема фазорегулирующего устройства, выполненного в "гексагональной" конфигурации

Модуль угла фазового сдвига ψ изменялся в зависимости от позиции переключения силовых ключей по закону, представленному на рис.3.28

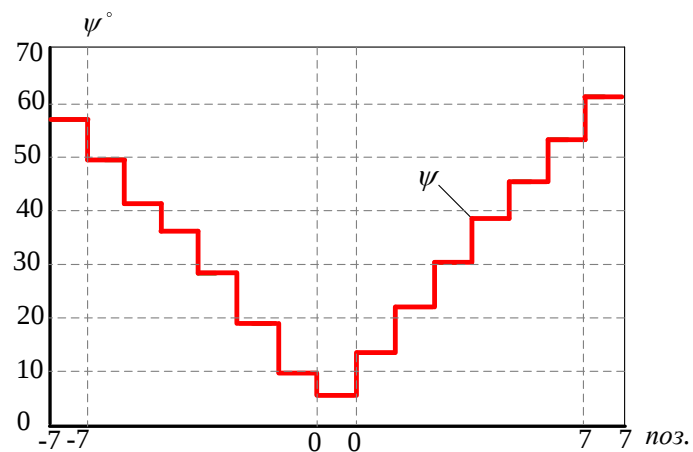


Рис.3.28. Зависимость угла фазового сдвига ψ от позиции переключения

Проведенные испытания исследуемого ФРТ (Приложение 7) в режимах холостого хода и короткого замыкания позволили определить характеристики устройства в процессе

регулирования угла фазового сдвига графики, которых, приведены соответственно на рис.3.29, 3.30 .

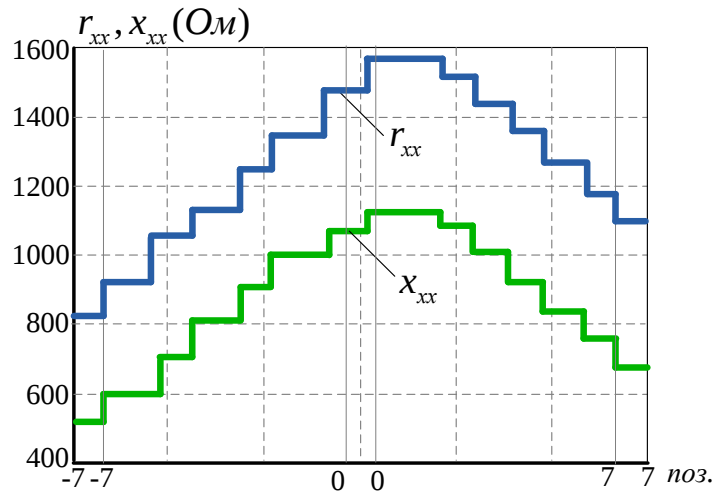


Рис.3.29. Характеристики активной r_{xx} и реактивной x_{xx} составляющих сопротивления холостого хода

Анализ рис.3.29 показывает, что максимальное значение сопротивлений холостого хода достигают при фазовом сдвиге $\psi \approx 35 \div 37^\circ$, что соответствует восьмой позиции переключения. Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания ($x_{кз}$) изменяется по параболическому закону и достигает минимума на шестой позиции, что соответствует $\psi \approx 26 \div 28^\circ$.

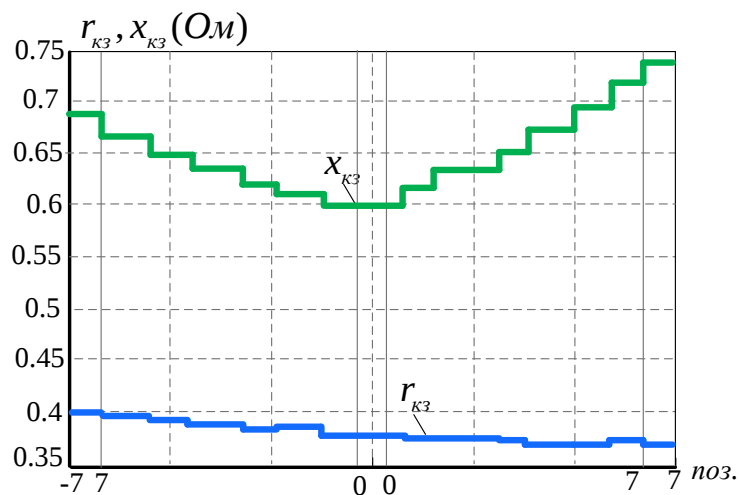


Рис.3.30. Характеристики активной $r_{кз}$ и реактивной $x_{кз}$ составляющих сопротивления короткого замыкания

Активная составляющая сопротивления короткого замыкания ($r_{кз}$) (рис.3.30) изменяется по экспоненциальному закону, достигая минимальных значений на пятнадцатой позиции, что соответствует углу $\psi \approx 60^\circ$.

На рис.3.31 представлены характеристики потерь активной мощности в ФРТ

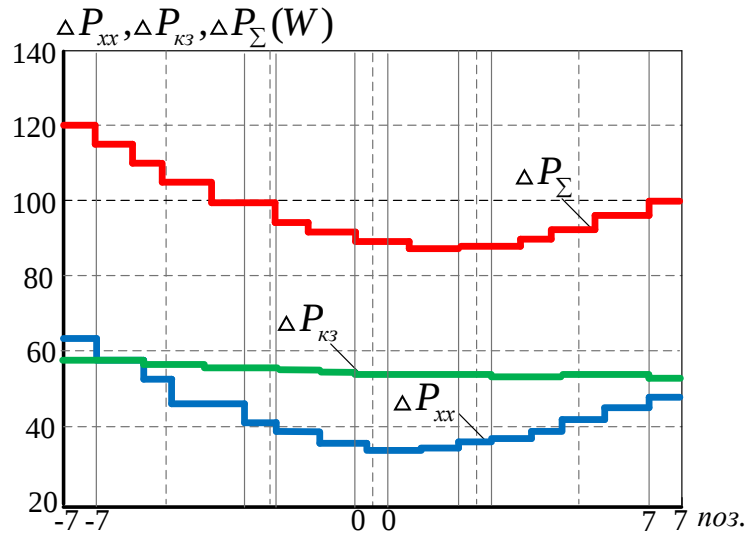


Рис.3.31. Зависимости изменения активных потерь от позиции переключения

В процессе исследований были также проведены испытания ФРТ при работе на активную нагрузку и соблюдении условия $I_r = 12A = const$. Графики изменения напряжений и токов в процессе регулирования приведены соответственно на рис.3.32,3.33.

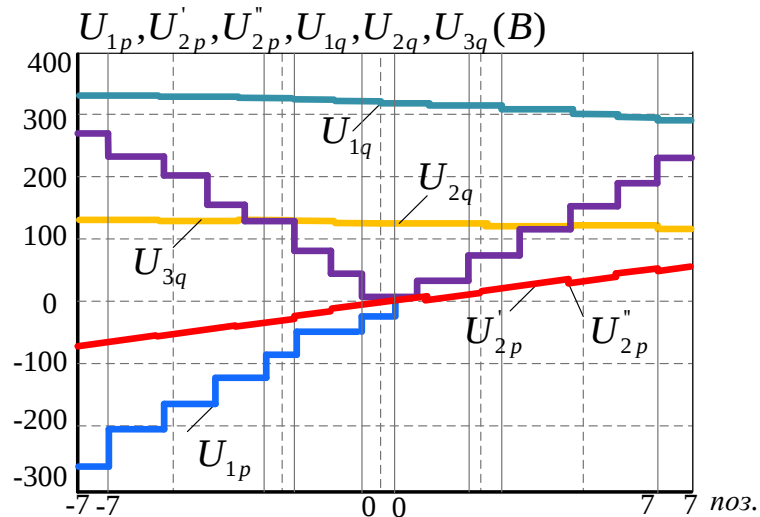


Рис.3.32. График изменения напряжения в элементах ФРТ

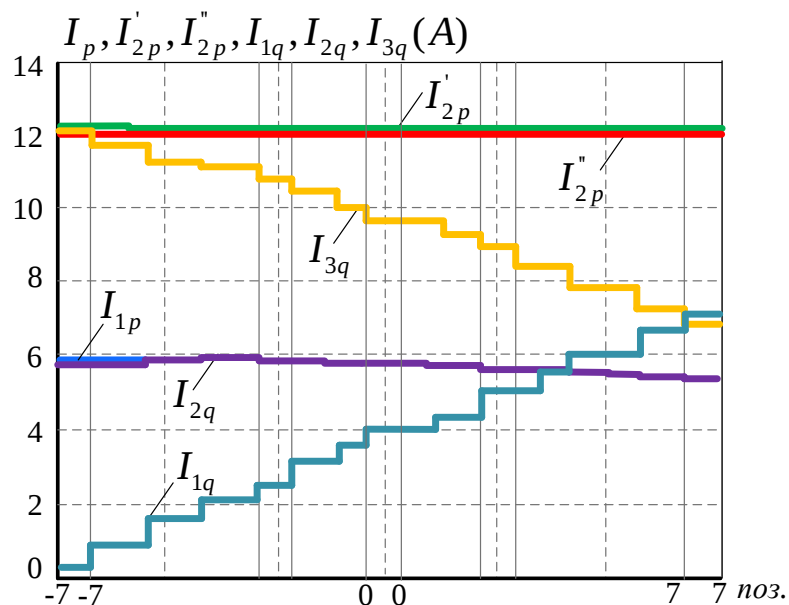


Рис.3.33. График изменения токов в элементах ФРТ

Рассмотренный в работе схемный вариант ФРТ может быть использован в качестве активного элемента современных Smart Grid систем.

3.6. Сравнительный анализ энергетических характеристик различных схемных вариантов ФРТ

Для определения технической эффективности рассмотренных в работе фазорегулирующих устройств использованы следующие характеристики:

$S_{ФРТ}/S_r$ -коэффициент, характеризующий установленную (типовую) мощность устройства;

S_{PE}/S_r -коэффициент, характеризующий мощность управления, приведенные в табл. 3.1.

Для сравнительного анализа, результаты которого приведены на рис.3.34, были выбраны рассмотренные выше схемные варианты фазорегулирующих устройств:

- 1-"звезда",
- 2-"однотрансформаторное ФРТ с регулированием в нейтрали",
- 3 -"треугольник",
- 4-"модифицированный треугольник",
- 5-"инвертированный многоугольник",
- 6-"модифицированный многоугольник",
- 7-ФРТ в "гексагональной" конфигурации.

Таблица 3.1. Сравнительные результаты исследования схем ФРТ

Схемные варианты фазорегулирующих устройств	S_{PST}/S_r , (о.е.)	S_{PE}/S_r (о.е.)
ФРТ, выполненный по схеме «Звезда»	1,97	0,955
Однотрансформаторное ФРТ с регулированием в нейтрали	1,72	1,22
ФРТ, выполненный по схеме треугольник	2,05	1,01
ФРТ, выполненный по схеме «модифицированный треугольник»	1,74	0,6
ФРТ, выполненный по схеме «инвертированный многоугольник»	1,69	0,56
ФРТ, выполненный по схеме «модифицированный многоугольник»	1,56	0,53
ФРУ в гексагональной конфигурации	1,61	0,58

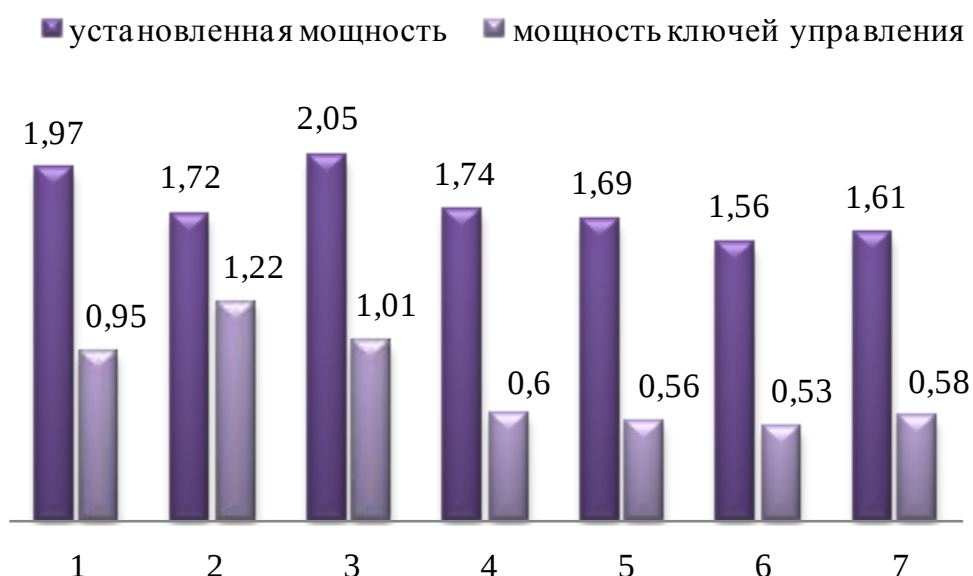


Рис.3.34. Сравнительная диаграмма установленной мощности различных схемных вариантов ФРТ

На диаграмме видно, что ФРТ, выполненный по схеме «модифицированный многоугольник» позволил существенно снизить установленную мощность трансформатора, а следовательно уменьшить его массогабаритные показатели. Установленная мощность трансформатора составляет 1,56 от проходной, что является одним из наименьших показателей. Кроме того предлагаемое устройство обладает наименьшим показателем затрат на систему регулирования угла фазового сдвига.

Следовательно данная схема обладает конкурентным преимуществом перед типовыми схемами фазосдвигающих трансформаторов.

В качестве одного из способов, направленных на снижение установленной мощности исследованных устройств, было предложено использовать конденсаторную батарею, включенную между входом и выходом параллельного трансформатора, т.е. емкостной передачи части мощности.

Преимущества применения конденсаторной батареи с ФРТ:

- относительно невысокие капиталовложения;
- небольшие эксплуатационные затраты;
- простой монтаж и эксплуатация.

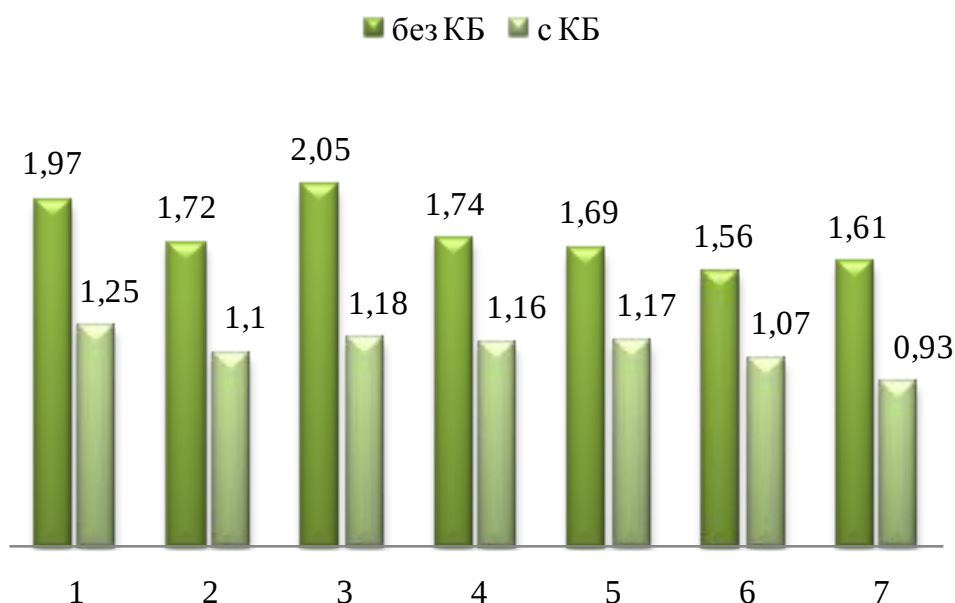


Рис.3.35. Сравнительная диаграмма установленной мощности различных схемных вариантов ФРТ с использованием конденсаторной батареи

На рис.3.35 представлена диаграмма типовой мощности различных схемных вариантов ФРТ с использованием конденсаторной батареи. Анализируя полученные результаты, можно сказать, что применение конденсаторной батареи позволяет существенно снизить установленную мощность ФРТ.

3.7. Выводы к третьей главе

1. Предложена система секционирования обмоток управления, позволившая обеспечить различное количество позиций регулирования угла фазового сдвига (семи, десяти, двенадцати и пятнадцати позиционное).

2. Разработаны и апробированы законы переключения силовыми ключами, реализующие требуемую стратегию управления.

3. Исследованы четыре новых схемных варианта ФРТ «модифицированный треугольник» «инвертированный многоугольник», «модифицированный многоугольник», «в гексагональной конфигурации» с диапазоном регулирования $\psi = 0 \div \pm 60^\circ$, для которых в среде Matlab/Simulink созданы SPS – модели.

4. На основе имитационных моделей выполнены расчетные эксперименты, результаты которых позволили проанализировать изменение параметров схемы замещения ФРТ в процессе регулирования угла. Рассчитаны и проанализированы возможные режимы работы устройств.

5. Результаты расчетных экспериментов позволили определить энергетические характеристики ФРТ, а также провести сравнительный анализ объектов исследования по выбранным критериям. Сравнительный анализ результатов дал возможность выбрать наиболее технически привлекательный вариант.

6. Применен метод снижения установленной мощности, основанный на использовании конденсаторной батареи, подключенной между входными и выходными зажимами ФРТ. Определены оптимальные параметры конденсаторной батареи. Показана эффективность предлагаемого способа (емкостной передачи части мощности), позволившего существенно уменьшить типовую мощность ФРТ.

7. Полученные результаты могут быть применены для сравнительного анализа схемных вариантов трансформаторных ФРТ устройств, разрабатываемых в перспективе.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ФРТ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТА КОМБИНИРОВАННЫХ FACTS

4.1. Статический частотный преобразователь на основе ФРТ

4.1.1. FACTS для объединения энергосистем с различными стандартами рабочей частоты

Существенное значение при объединении энергосистем с различной рабочей частотой или стандартами по поддержанию рабочей частоты имеют FACTS – контроллеры, позволяющие обеспечить качественный процесс преобразования/согласования частоты. В настоящее время развитие получили два основных направления такого рода технологий:

1. Преобразование на постоянном токе (HVDC [50,119,51,109,162,168,67,104,35], back-to-back [110]).

К основным достоинствам этой технологии можно отнести универсальность и быстроедействие с точки зрения управления перетоками мощности, а также возможность передачи большей мощности по сравнению с передачей на переменном токе. Минусом преобразователя HVDC является необходимость двойного преобразования энергии (выпрямление и инвертирование) как на передающей, так и на приемной стороне. Это приводит к гармоническим искажениям синусоид рабочих токов и напряжений, что в свою очередь, требует применения сложных фильтро-компенсирующих устройств.

2. Преобразование на переменном токе (VFT- variable frequency transformer [123,127,98,136], ASEFC или АСЭМПЧ -асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты (asynchronized synchronous electromechanical frequency converter [57,133,100,59,142,128,30,165])).

Основное достоинство поворотного трансформатора VFT состоит в том, что при любой кратности преобразования частоты рабочие напряжения и токи на его выходных клеммах всегда остаются строго синусоидальными. К недостаткам можно отнести:

- необходимость применения скользящих (щеточных) токосъемных контактов, что приводит к снижению надежности функционирования установки;

- дополнительное (помимо собственных электрических потерь) расходование энергии на управление, связанное с необходимостью поддержания заданного уровня обменной мощности между системами за счет создания соответствующего вращающего момента сервомотора;

- наличие механической инерционности ротора, сопровождающееся появлением электромеханических переходных процессов, что является дополнительным фактором

негативного влияния на точность регулирования и стабилизации уровня передаваемой мощности;

-наличие воздушного зазора между обмотками статора и ротора связано со значительным повышением тока холостого хода устройства до величины, соизмеримой с током нагрузки. Следует также отметить, что использование VFT влечет за собой увеличение продольного индуктивного сопротивления соответствующего тракта электропередачи и вызываемую этим необходимость применения специальных компенсирующих устройств в целях поддержания заданного напряжения по концам линии.

Разработка альтернативных, относительно VFT и HVDC, технических средств преобразования частоты для электрических систем позволит повысить степень управляемости транспортных и распределительных сетей, что является характерной тенденцией современного этапа развития электроэнергетики.

В главе исследованы параметры режима электрической связи, содержащей конвертор частоты, реализующий новую технологию преобразования на основе статического трансформаторного устройства с круговым вращением фазы, причем, предлагаемое техническое решение позволяет избавиться от недостатков, отмеченных в перечисленных ранее работах, а также может оказаться дешевле [17,19,106,152,49,107].

4.1.2.Условия проведения экспериментов

Расчетные эксперименты были проведены исходя из следующих условий:

- напряжение передающей системы $U_s = 230B$, частота $f_s = 60Гц$;
- напряжение приемной системы $U_r = 230B$, частота $f_r = 50Гц$;
- активная мощность передавалась в направлении от энергосистемы S к энергосистеме R ;
- передающая S и приемная R энергосистемы представлены в моделях как шины бесконечной мощности, т.е. $U_s = U_r = const$;
- уровень передаваемой активной мощности поддерживался на постоянном уровне $4500Вт \pm 10\%$ за счет корректировки угла между передающей и приемной системой;
- параметры имитационных моделей приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя;
- расчетное время моделирование $t = 2$ секунды;

-
- P_s, Q_s, I_s, U_s
 S система
 60 Гц 230 В
- T_s
- C_s
- ЛЭП L_T
- C_T C_T
- P_r, Q_r, I_r, U_r
 R система
 50 Гц 230 В

- отклонение (девиация) передаваемой активной мощности на передающей $\partial P_s, \%$ и приемной $\partial P_r, \%$ системах;
- коэффициент гармонических искажений тока на передающей $THD(I_s), \%$ и приемной $THD(I_r), \%$ системах.

91

Основным элементом преобразователя, определяющим его отличие от других технических решений, является фазорегулирующий трансформатор (C_s), образованный соединенными в треугольник нерегулируемыми обмотками (W_p) и примыкающими к вершинам этого треугольника регулируемыми обмотками (W_q). При этом каждая присоединенная к конкретной вершине треугольника регулируемая обмотка принадлежит фазе соответствующей нерегулируемой обмотки, которая противоположит данной вершине. Все регулируемые обмотки были выполнены по схеме, представленной на рис.4.3.

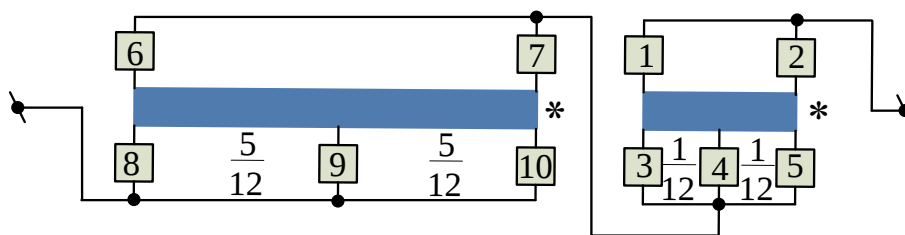


Рис.4.3. Обмотка управления преобразователя секционированная под 12 позиций переключения

Каждая регулируемая обмотка разделена на две секции, имеющие промежуточные ответвления которые, также как и концевые выводы секций этих обмоток, присоединены к силовым электронным коммутаторам. Собственно коммутаторы условно изображены в виде квадратов, пронумерованных цифрами от 1 до 10. Дробные арифметические соотношения характеризуют принцип секционирования регулируемых обмоток, обеспечивающий при данных условиях 12 дискретных значений снимаемого с них напряжения (как условно положительного, так и противоположного ему знака при реверсировании). Совокупность, представляемая фазорегулирующим трансформатором и силовыми электронными коммутаторами регулируемых обмоток, образует блок тонкого регулирования преобразовательного устройства и предусматривает возможность регулирования фазового сдвига выходного напряжения относительно приложенного в диапазоне $\pm 30^\circ$.

Полная окружность регулирования, как показано на рис.4.4, разделена на 6 отдельных секторов, по 60° каждый, в рамках которых осуществляется процедура тонкого регулирования, обеспечиваемая секционированными обмотками управления рис.4.3. Переключение секторов обеспечивается с помощью силовых полупроводниковых коммутаторов SS , которые, совместно с силовым трансформатором T_s , образуют блок грубого регулирования. Вторичная обмотка трансформатора T_s выполнена по схеме правильного шестиугольника, вершины которого являются опорными точками

соответствующих секторов. Первичная обмотка силового трансформатора T_s подключена к питающей сети. К выходным клеммам фазорегулирующего трансформатора C_s подключена нагрузка.

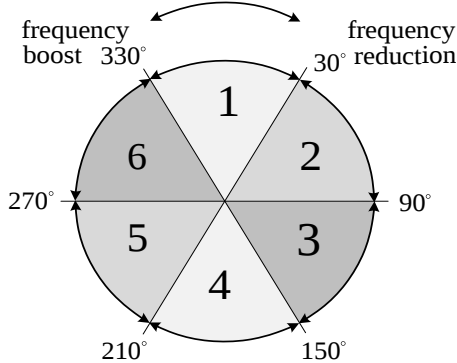


Рис.4.4. Сектора грубого регулирования устройства

При симметричном (одновременном) переключении обмоток управления степень дискретности одной ступени составляет $2,5^\circ$. Таким образом, каждый сектор грубого регулирования содержит 24, а вся окружность содержит 150 фиксированных позиций значений угла фазового сдвига. Стратегию управления для данных условий отражает диаграмма переключения, представленная на рис.4.5.

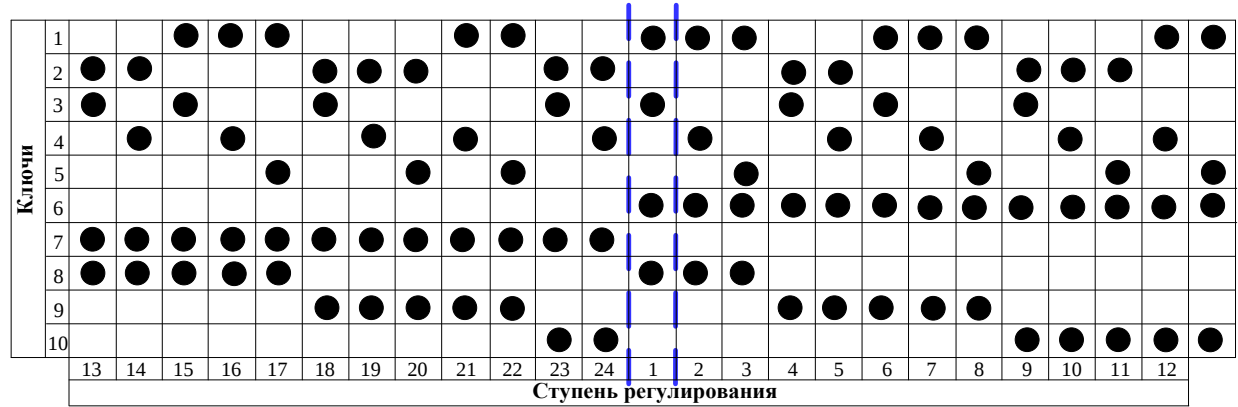


Рис.4.5. Стратегия управления преобразователем при симметричном переключении с дискретностью ступени $2,5^\circ$

На основе структурно-имитационной модели были проведены расчетные эксперименты по схеме рис.4.1. Осциллограммы и характеристики, иллюстрирующие поведение контролируемых режимных параметров, приведены на рис.4.6.a,c для передающей и рис.4.6.b,d для принимающей систем соответственно.

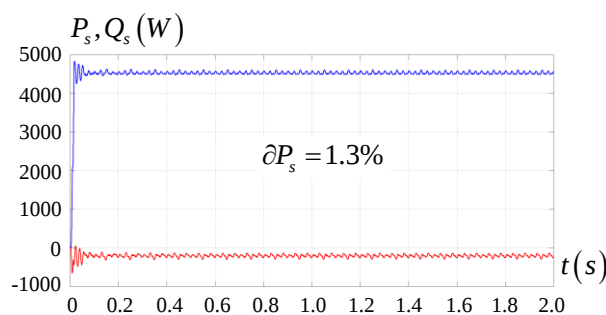


Рис.4.6.а. Активная и реактивная мощность на передающей P_s системе

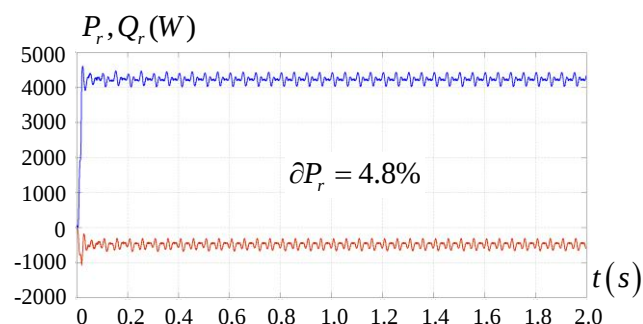


Рис.4.6.б. Активная и реактивная мощность на приемной P_r системе

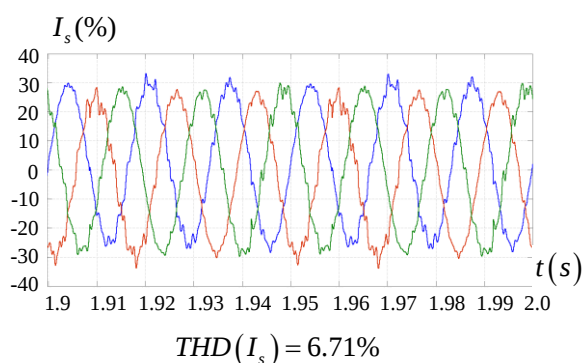


Рис.4.6.с. Осциллограмма токов на передающей I_s системе

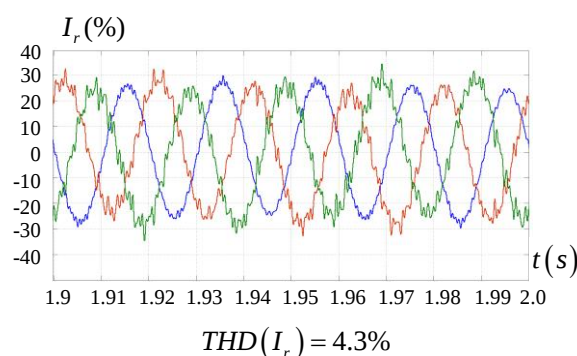


Рис.4.6.д. Осциллограмма токов на и приемной I_r системе

Проанализировав представленные на рис.4.6 характеристики, сделан вывод о том, что учет емкостной проводимости ЛЭП приводит к превышению уровня искажений кривых тока допустимых пределов, регламентируемых стандартом IEEE-519-2014.

Искажения кривых тока обусловлены срабатыванием переключателей блока грубого регулирования. Технические средства подавления подобного рода явлений хорошо известны. В качестве таковых широко применяются специальные активно-емкостные снабберы и нелинейные варисторы. Кроме того существует возможность применения чисто технологических мероприятий.

4.1.4. Двухканальный преобразователь частоты

Одним из эффективных мероприятий по улучшению качества преобразования, был предложен способ разделения потока передаваемой мощности на два параллельных канала с разнесением моментов коммутации блоков грубого регулирования по времени за счет фиксированного 30-и градусного фазового сдвига между напряжениями питающей системы. Схема двухканального преобразователя на базе 6-и фазного согласующего трансформатора и стратегией управления, описанной в п.4.1, представлена на рис.4.7.

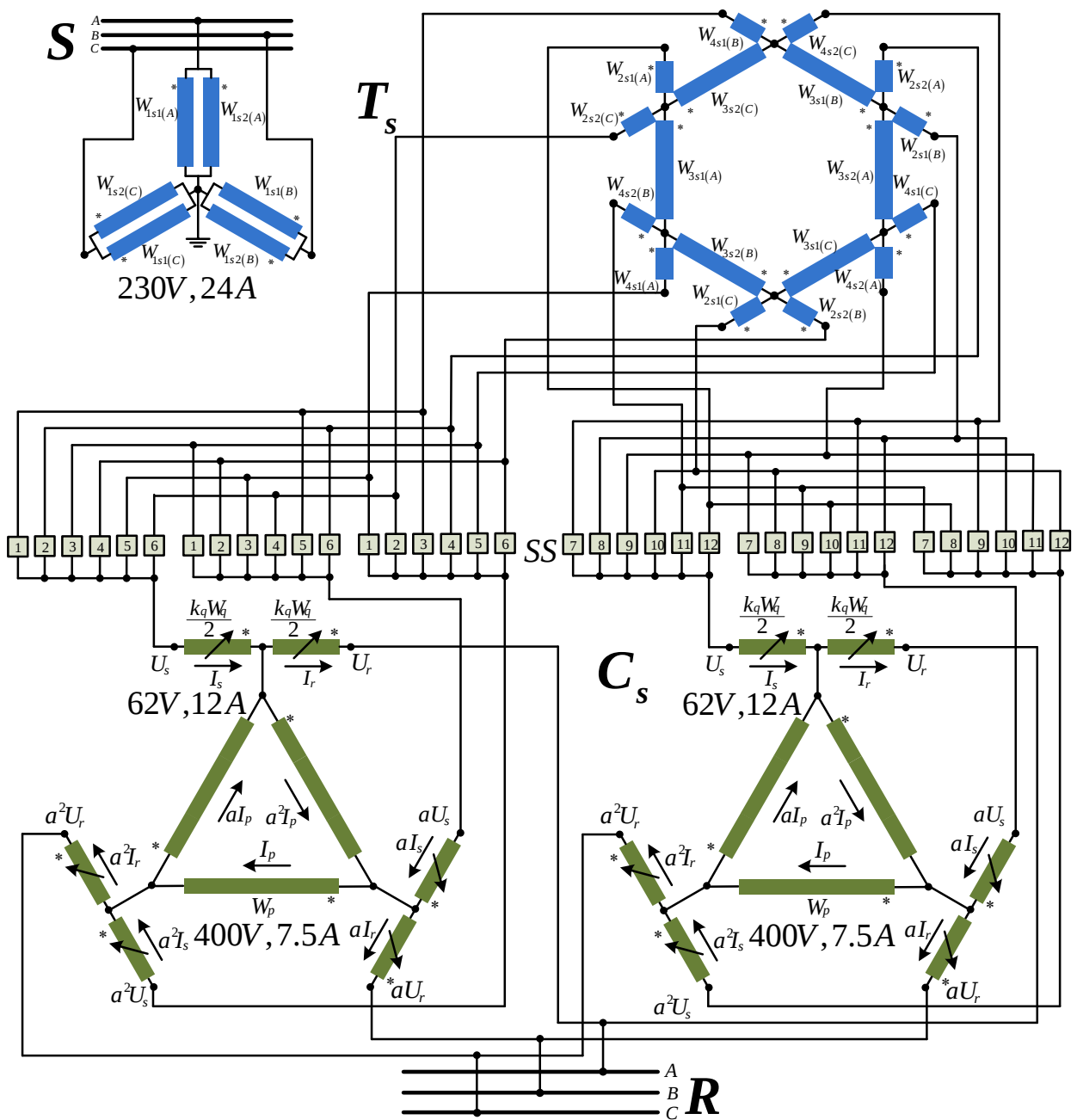


Рис.4.7. Электрическая схема двухканального преобразователя

Осциллограммы и характеристики, полученные в ходе расчетных экспериментов и, иллюстрирующие эффективность двухканальной схемы с точки зрения улучшения параметров качества преобразования, приведены на рис.4.8.а,с для передающей и рис.4.8.б,д для принимающей систем соответственно.

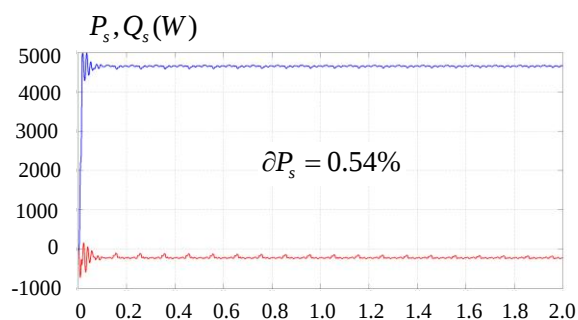


Рис.4.8.а. Активная и реактивная мощность на передающей P_s системе

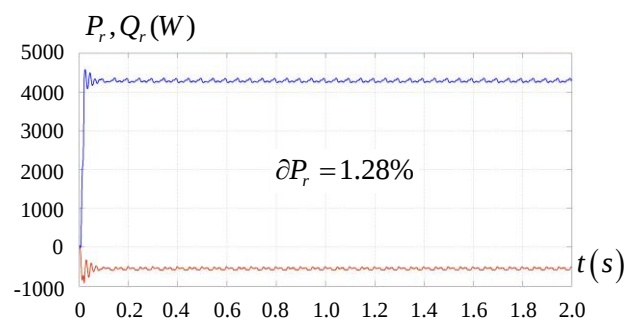


Рис.4.8.б. Активная и реактивная мощность на приемной P_r системе

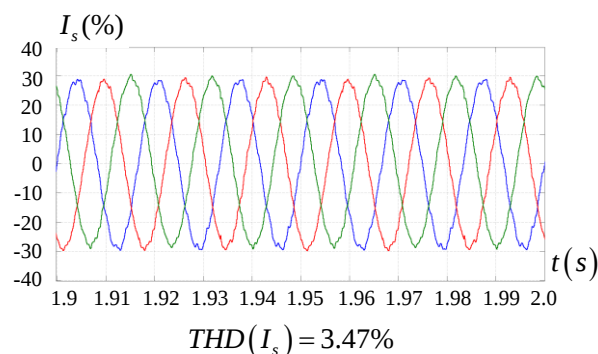


Рис.4.8.с. Осциллограмма токов на передающей I_s системе

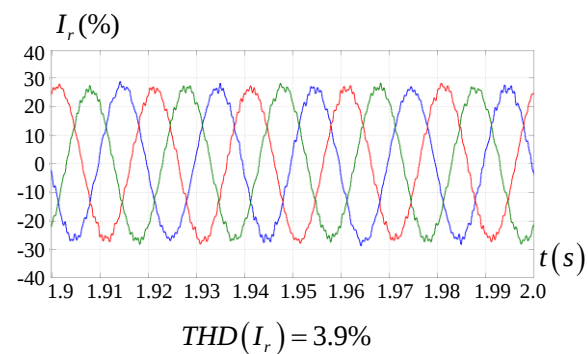


Рис.4.8.д. Осциллограмма токов на приемной I_r системе

Было выполнено сравнение результатов, приведенных на рис.4.6 и рис.4.8, из которого следует, что применение двухканальной схемы позволило существенно улучшить качество преобразования по частоте и отклонению передаваемой мощности.

В качестве следующего шага на пути усовершенствования двухканальной схемы преобразования частоты был предложен новый вариант секционирования обмоток управления фазовращающего трансформатора, а также новый закон управления силовыми ключами, позволившие, при обеспечении 24 ступеней переключения, обойтись без реверсирования обмотки управления. Схема предложенной обмотки управления и закон управления силовыми ключами представлены на рис. 4.9 и рис.4.10 соответственно.

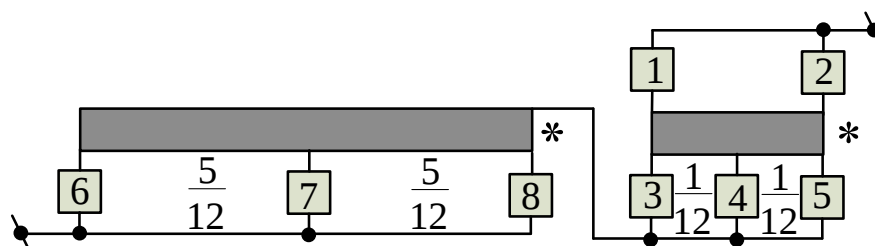


Рис.4.9. Обмотка управления фазовращающего трансформатора, обеспечивающая «безреверсную» стратегию управления

Правый ФРТ (S7,S2,S8,S3,S9,S4,S10,S5,S11,S6,S12,S1)												Левый ФРТ (S1,S7,S2,S8,S3,S9,S4,S10,S5,S11,S6,S12)											
Ключи	1			●	●	●			●	●	●			●	●	●			●	●	●		
	2	●	●				●	●				●	●	●				●	●			●	●
	3	●		●			●		●			●		●				●		●			●
	4		●		●			●		●			●		●				●		●		●
	5				●					●				●					●				●
	6	●	●	●	●	●													●	●	●	●	●
	7					●	●	●	●	●					●	●	●	●					
	8										●	●		●	●	●							

Рис.4.10. Закон управления силовыми ключами двухканального преобразователя

Схема двухканального 24-позиционного преобразователя на базе «безреверсной» стратегии управления представлена на рис.4.11.

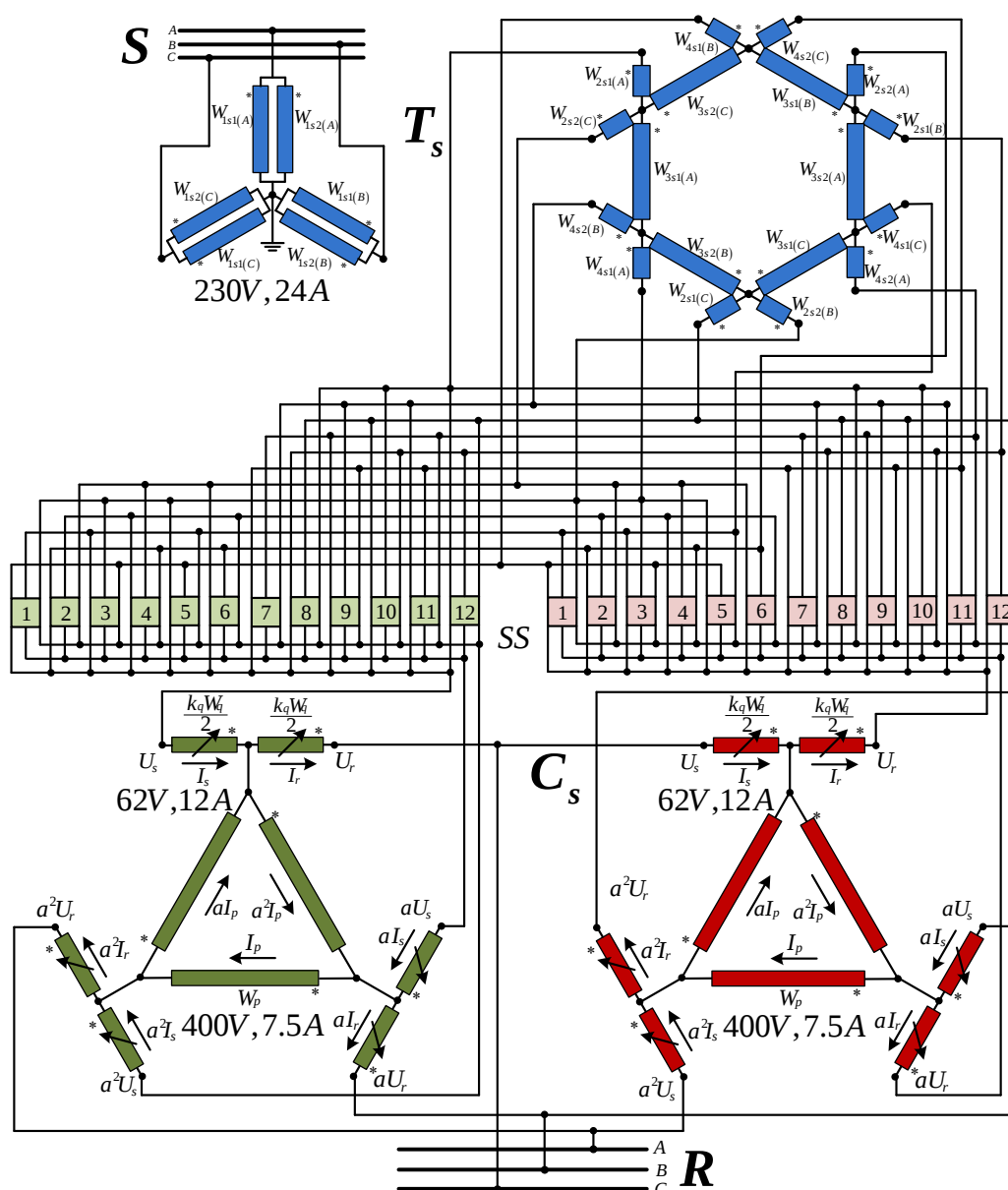


Рис.4.11. Электрическая схема двухканального преобразователя на базе «безреверсной» стратегии управления

Преобразователь рис.4.11 имеет на 12 силовых ключей грубого регулирования больше и на 24 силовых ключа тонкого регулирования меньше по сравнению со схемным вариантом, рис.4.5. Следует отметить, что и в первом и во втором случае, суммарная мощность ключей грубого регулирования остается неизменной.

Результаты экспериментов, полученных при моделировании двухканального преобразователя с «безреверсной» стратегией управления представлены на рис.4.12.а,с для передающей и рис.4.12.б,д для принимающей систем соответственно.

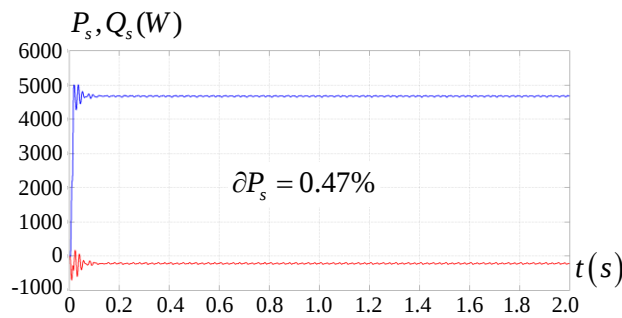


Рис.4.12.а. Активная и реактивная мощность на передающей P_s системе

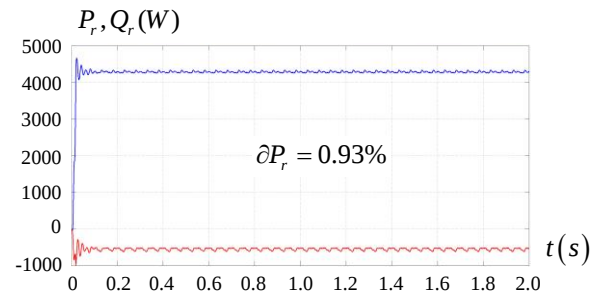


Рис.4.12.б. Активная и реактивная мощность на приемной P_r системе

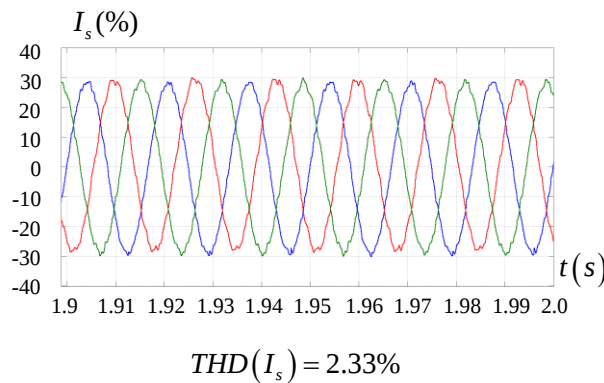


Рис.4.12.с. Осциллограмма токов на передающей I_s системе

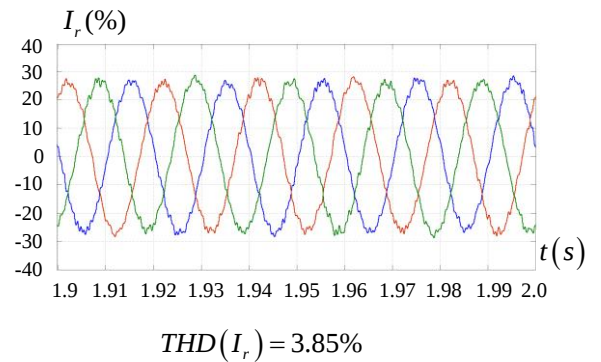


Рис.4.12.д. Осциллограмма токов на и приемной I_r системе

Проведено сравнение информации, представленной на рис.4.12 и рис.4.8 и сделано заключение о технической эффективности «безреверсной» стратегии управления, при использовании которой улучшаются характеристики преобразования. Это обусловлено более «мягким» режимом переключения за счет меньшего суммарного количества силовых ключей в схеме, создающих при коммутации всплески (стробы) тока и напряжения.

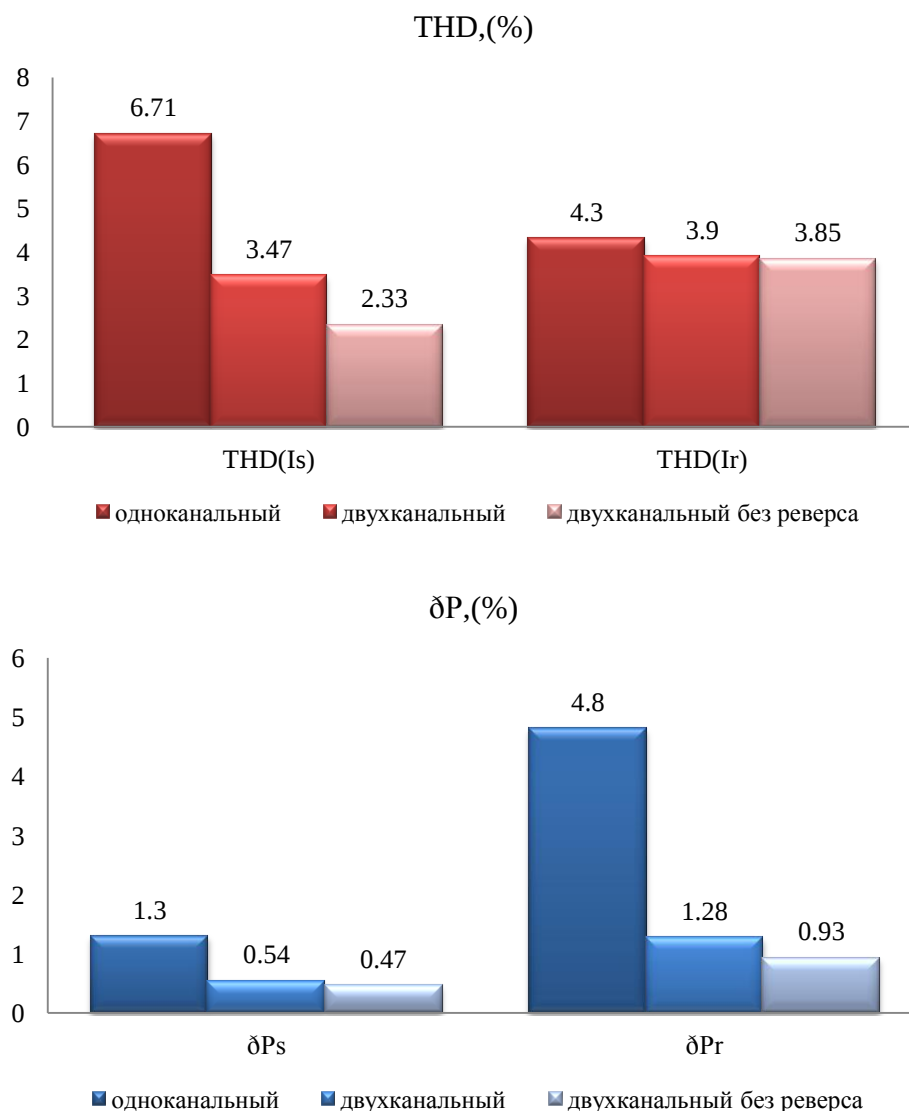


Рис.4.13. Режимные параметры передачи при различных способах улучшения качества преобразования

Результаты сравнительного анализа различных технических мероприятий по повышению эффективности работы частотного преобразователя на основе ФРТ приведены на рис.4.13 в виде гистограмм, которые указывают на эффективность предлагаемых решений.

4.2. Индуктивные элементы (дроссели) как средство повышения качества преобразования

4.2.1. Постановка задачи и условия моделирования

Задача исследования состояла в поиске технических решений, позволяющих усовершенствовать процесс преобразования в электрической связи, объединяющей две энергосистемы с частотой 60 и 50 Гц.

В процессе достижения цели был проведен комплекс расчетных экспериментов на основе разработанных структурно-имитационных моделей. [15]

В рамках решения поставленной задачи было предложено применение продольных индуктивных элементов (дросселей) в качестве одной из мер, улучшающей контролируемые режимные параметры в процессе преобразования частоты. Расчетные эксперименты проводились исходя из следующих условий:

- напряжение передающей системы $U_S = 230B$, частота $f_s = 60Гц$;
- напряжение приемной системы $U_R = 230B$, частота $f_r = 50Гц$;
- активная мощность передавалась в направлении от энергосистемы S к энергосистеме R ;
- передающая S и приемная R энергосистемы представлены в моделях как шины бесконечной мощности, т.е. $U_S = U_R = const$;
- уровень передаваемой активной мощности поддерживался на постоянном уровне $4500Вт \pm 10\%$ за счет корректировки угла между передающей и приемной системой;
- допустимый угол по передаче ограничен величиной $\psi = 60^\circ$;
- параметры имитационных моделей приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя;
- расчетное время моделирования $t = 2$ секунды;
- контролируемые режимными характеристиками являлись: величина отклонения (девиации) активной мощности $(\partial P_S, \partial P_R)$ и коэффициенты гармонических искажений токов $(THD(I_S), THD(I_R))$ на передающей S и приемной R системах;
- дроссели устанавливались за устройством на стороне приемной системы.

4.2.2. Схемные варианты частотного преобразователя

В состав электрической связи на различных этапах моделирования входили несколько схемных вариантов частотного преобразователя (одноканальная схема (рис.4.2), двухканальная с применением реверсирования секций обмотки управления (рис.4.7), двухканальная схема без реверсирования системы управления (4.11)).

4.2.3. Результаты моделирования

Схема проведения эксперимента для исследуемых схемных вариантов преобразователей представлена на рис.4.14.

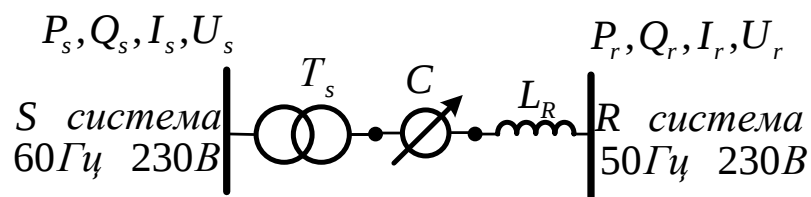


Рис.4.14. Схема проведения эксперимента

Для выяснения влияния величины индуктивности дросселя на качество процесса преобразования при согласовании частоты в процессе моделирования изменялась величина индуктивности дросселей, подключаемых со стороны приемной системы.

Зависимости контролируемых режимных параметров от величины индуктивности подключаемого дросселя (L_R) приведены на рис.4.15-4.18 для рассмотренных схемных вариантов преобразователей:

1. одноканального;
2. двухканального с реверсированием секций обмотки управления;
3. двухканального без реверсирования секций обмотки управления.

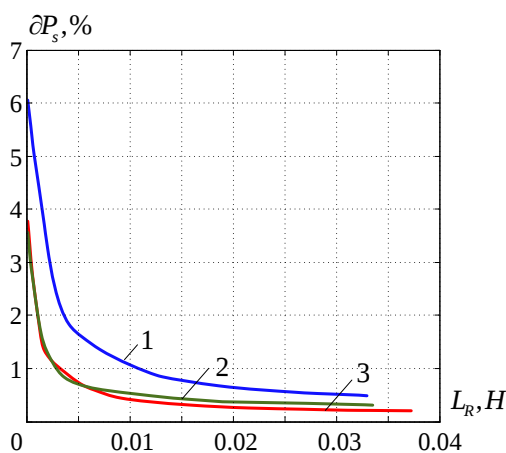


Рис.4.15. Степень колебательности активной мощности на шинах передающей системы

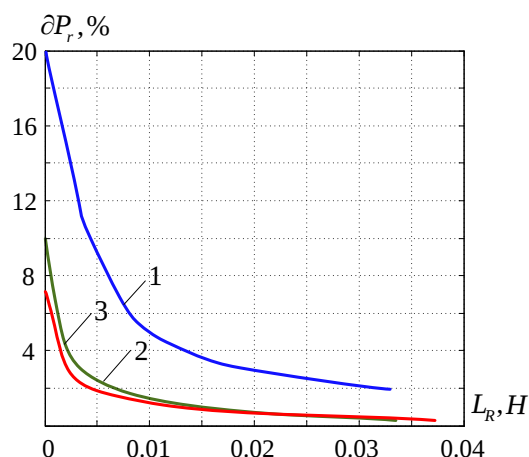


Рис.4.16. Степень колебательности активной мощности на шинах приемной системы

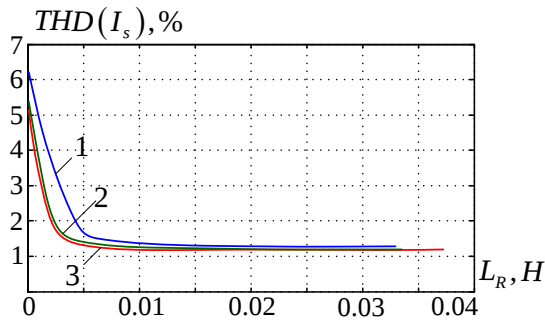


Рис.4.17. Коэффициент гармонических искажений тока на шинах передающей системы

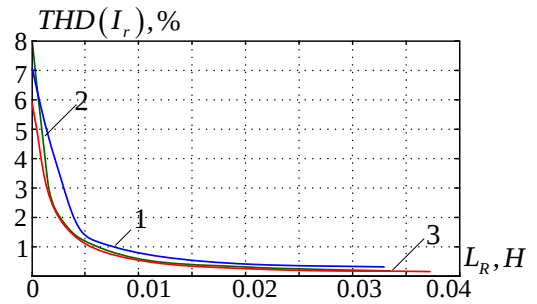


Рис.4.18. Коэффициент гармонических искажений тока на шинах приемной системы

Представленные зависимости проиллюстрировали преимущество двухканальной безреверсной схемы с точки зрения качества режимных параметров.

Изменение величины индуктивности дросселя от 0 до 0,35 позволило улучшить контролируемые величины:

- коэффициент гармонических искажений тока на передающей системе $THD(I_s)$ для схем двухканального преобразователя на 0,08% ниже, чем для одноканального преобразователя;
- коэффициент гармонических искажений тока на приемной системе $THD(I_r)$ для двухканального преобразователя с реверсированием и без реверсирования секций обмотки управления на 0,13% и 0,17% ниже, чем для одноканального преобразователя;
- величина девиации активной мощности на передающей системе ∂P_s для одноканального преобразователя практически в два раза выше, чем для вариантов преобразователей в двухканальном исполнении и составляет 0,49%;
- девиация активной мощности на приемной системе ∂P_r для двухканальных преобразователей существенно лучше (почти в десять раз), чем для одноканального преобразователя.

Представленные зависимости (рис.4.15-4.18) позволили определить значения индуктивностей дросселей, обеспечивающие наилучшие характеристики передачи:

- для 1-го варианта $L = 0.033 Гн$;
- для 2-го варианта $L = 0.034 Гн$;
- для 3-го варианта $L = 0.037 Гн$.

Гистограммы, иллюстрирующие соотношение контролируемых параметров режима преобразования для выбранных дросселей, приведены на рис. 4.19-4.20.

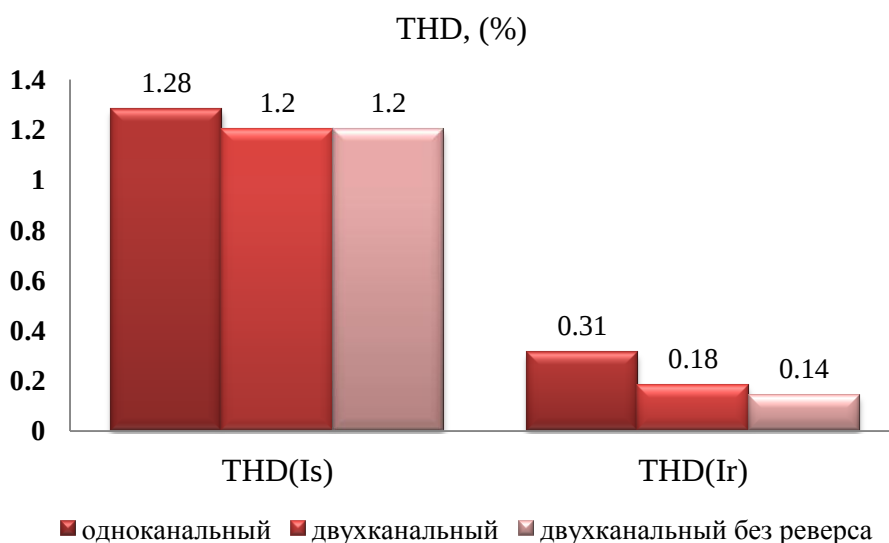


Рис.4.19. Коэффициенты гармонических искажений токов на передающей и принимающей системах

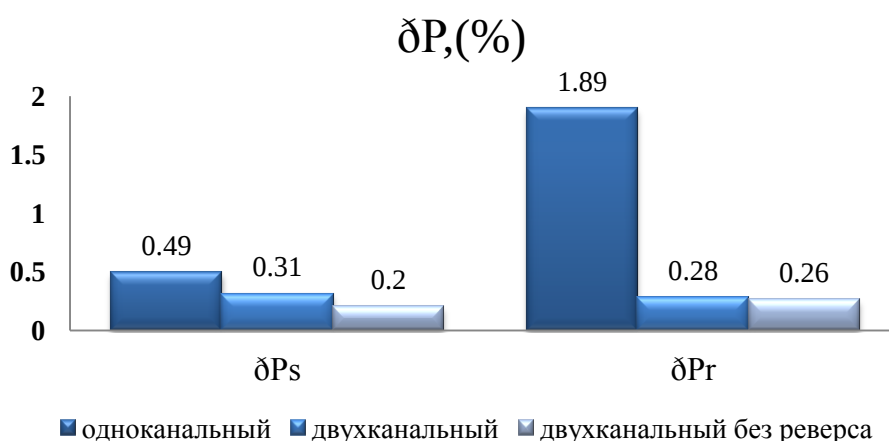


Рис.4.20. Девиация активной мощности на передающей и принимающей системах

Приведенные на рис.4.19,4.20 данные позволили сделать вывод о соответствии контролируемых характеристик режима стандарту IEEE-519-2014.

4.3. Источник реактивной мощности, управляемый ФРТ

Одним из важных компонентов развития технологии «Smart Grid» применительно к электроэнергетике является использование FACTS-контроллеров, быстроедействие, которых обеспечивается применением средств силовой электроники. Особенно это

становится актуальным при возрастающем объеме использования распределенной генерации, а также возобновляемых источников энергии.

В связи с этим, получают широкое распространение различные устройства регулирования реактивной мощности, позволяющие обеспечить комплексное (как по модулю, так и по фазе) управление параметрами режима [145,58,140,66,161,52,151].

Реактивная мощность является одним из основных индикаторов, характеризующих работу электрических систем. К источникам реактивной мощности как правило, относят устройства, управляемые вручную или автоматически, способные адресно воздействовать на баланс реактивной мощности в электроэнергетической системе.

В связи с тем, что компенсация реактивной мощности обеспечивает достаточно высокую экономическую и энергетическую эффективность, в промышленно развитых странах решению этого вопроса уделяют особое внимание. [129,48,160,71]

В представленном параграфе на основе структурно-имитационных SPS моделей было исследовано устройство для компенсации реактивной мощности, построенное на базе парных реактивных элементов, регулируемых фазоповоротным трансформатором (ФРТ) с применением средств силовой электроники. [10]

Для управления предложенным схемным вариантом ИРМ был использован ФРТ, выполненный в гексагональной конфигурации. Принципиальная схема (рис.3.27) и результаты исследования, возможностей снижения установленной мощности, используемого для управления ИРМ ФРТ, были рассмотрены ранее в главе 3.

Фазорегулирующий трансформатор, рассмотренный выше, был использован в качестве органа управления устройством, предназначенным для компенсации реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера. Предлагаемое устройство состоит из следующих элементов:

- трансформатора, с первичными обмотками, соединенными попарно в звезду и включенными в рассечку линии, а также вторичными обмотками, соединенными по схеме шестиугольника;
- фазорегулирующего трансформатора, включенного пофазно к вершинам шестиугольника и возможностью реверсирования;
- сопряженных реактивных проводимостей L и C , присоединенных к устройству, по схеме, представленной на рис. 4.21.

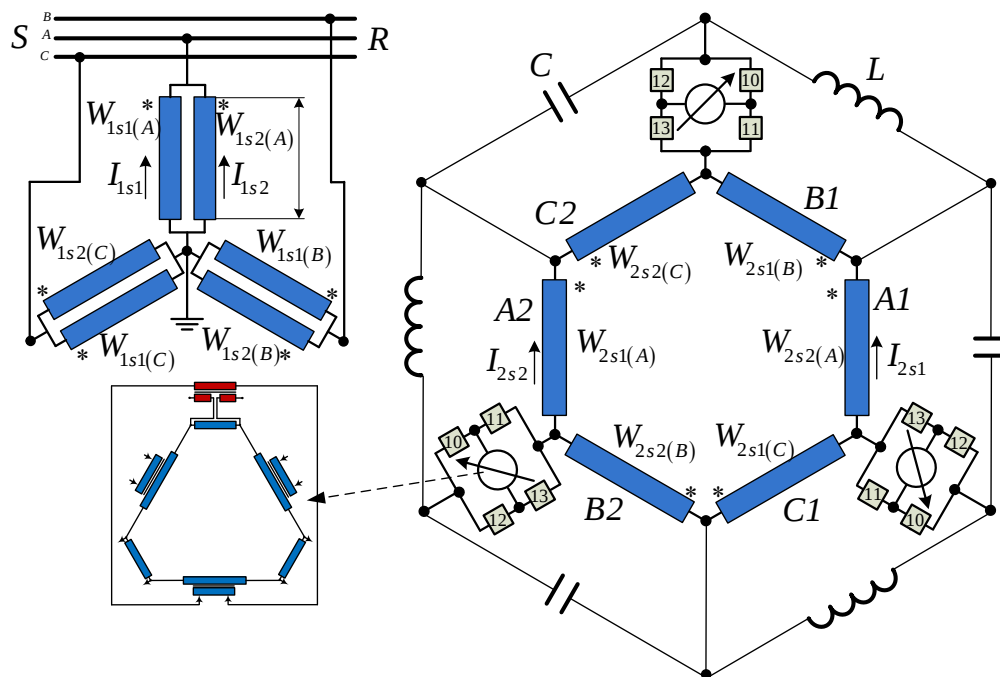


Рис.4.21. Схема управляемого источника реактивной мощности

Для исследования режима работы управляемого компенсирующего устройства была построена структурно-имитационная SPS-модель на частоту $F = 50 \text{ Гц}$, и напряжение питания $U = 230 \text{ В}$. Параметры парных реактансов были приняты из условия равенства сопротивлений $x_L = x_C$. Величина сопряженных реактивных проводимостей составила $L = 0.33275 \text{ Гн}$, $C = 3.0476 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$.

В процессе исследования работы источника реактивной мощности были проанализированы следующие параметры:

- Полный ток на выходе устройства, кривая изменения которого в процессе регулирования приведена на рис.4.22;

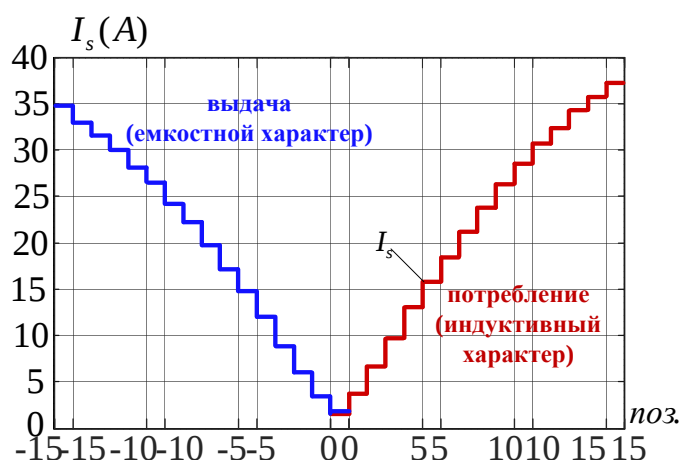


Рис.4.22. График изменения выходного тока устройства

- Потери активной мощности, характер изменения величины которых, имеет сложную форму и представлен на рис.4.23;

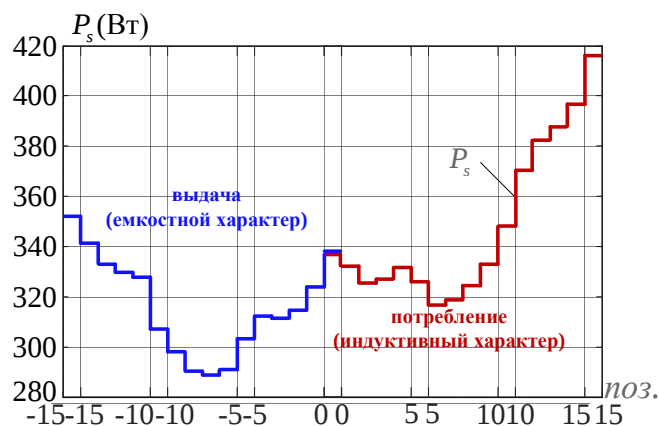


Рис.4.23. График изменения величины активных потерь

Как видно из рис.4.23., максимальная величина потерь активной мощности имеет место в режиме потребления реактивной мощности и составляет примерно 5% от установленной мощности устройства.

- Реактивная мощность в режимах выдачи и потребления отображена на рис.4.24.

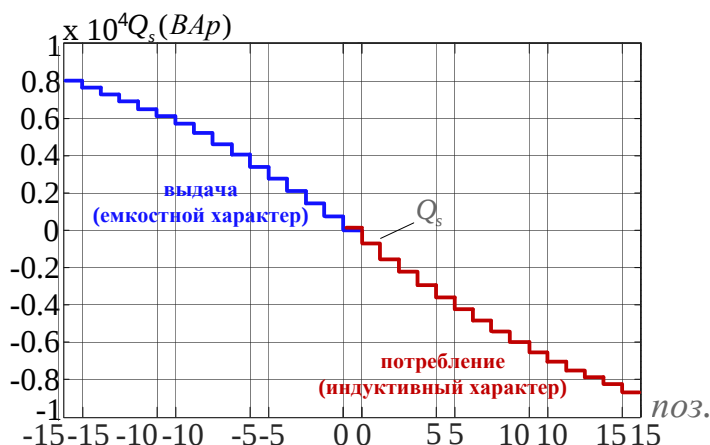


Рис.4.24. График выдачи и потребления реактивной мощности

Анализ представленной на рис.4.24 зависимости позволил сделать заключение о том, что предлагаемое устройство дало возможность осуществлять практически симметричное регулирование реактивной мощности как потребляемой, так и выдаваемой в сеть.

4.4.Выводы к четвертой главе

1. Предложен схемный вариант одноканального преобразователя частоты на базе фазорегулирующего трансформатора с круговым вращением фазы выходного

напряжения. Разработана обмотка управления и стратегия регулирования, обеспечивающая 24 позиции переключения в каждом 60° -ом секторе грубого регулирования с дискретностью $2,5^\circ$ и реверсированием обмотки управления. Результаты исследования устройства показали принципиальную возможность реализации преобразователя частоты на основе ФРТ с круговым вращением фазы.

2. В рамках разработки технических решений, обеспечивающих улучшение качества преобразования по частоте и передачи мощности без применения специальных фильтров, предложен двухканальный вариант конвертора с 30° -и градусным фазовым сдвигом между каналами по напряжению, позволивший существенно уменьшить колебания активной мощности в передаче в процессе согласования частот.

3. Предложен новый вариант секционирования обмоток управления фазовращающего трансформатора, а также новый закон управления силовыми ключами, позволившие, при обеспечении 24 ступеней переключения, обойтись без реверсирования обмотки управления и существенно уменьшить число силовых элементов в двухканальной схеме, что может привести к удешевлению устройства в целом.

4. Результаты проведенных расчетных экспериментов показали неоспоримое преимущество «безреверсной» двухканальной схемы преобразователя.

5. Доказан положительный эффект, получаемый за счет включения в передачу индуктивных элементов (дросселей) на качественные характеристики преобразования по мощности и частоте. Определены значения индуктивности дросселей, находящиеся в диапазоне $0,03\text{--}0,035\text{ Гн}$, обеспечивающие оптимальные характеристики передачи.

6. Предложен и исследован схемный вариант нового FACTS-контроллера выполняющего функции источника реактивной мощности и управляемого ФРТ. Показано, что предлагаемое техническое решение обеспечивает симметричное регулирование реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера в широком диапазоне в точке подключения устройства к сети.

7. Разработанные FACTS-контроллеры могут быть использованы в качестве активных элементов для управления режимами современных Smart Grid энергосистем.

5. ЛАБОРАТОРНЫЙ ОБРАЗЕЦ ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

5.1. Параметры и характеристики лабораторного образца

5.1.1. Структурно-имитационная модель лабораторного образца

Для построения лабораторной физической модели был выбран фазорегулирующий трансформатор с одним из наименьших показателей по установленной мощности, выполненный в гексагональной конфигурации с применением технологии УПКФРТ, схема которого представлена на рис.5.1.

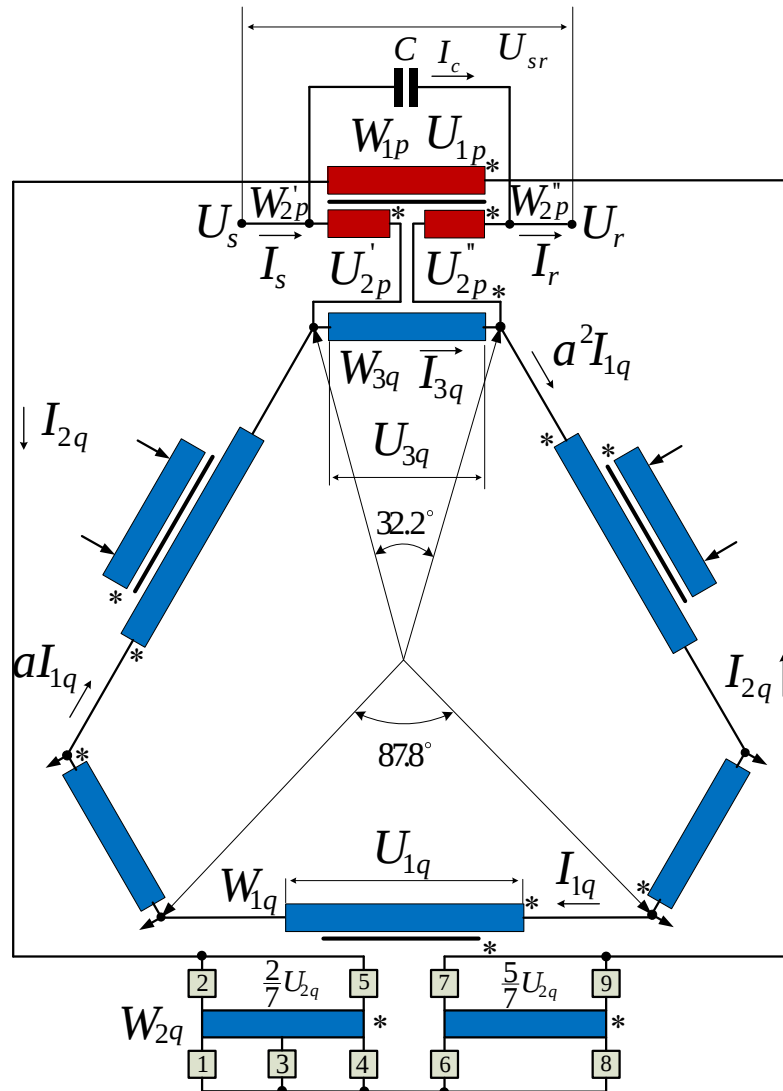


Рис.5.1. Схема ФРТ, принятого для физического моделирования

Для регулирования угла фазового сдвига ФРТ рис.5.1 применен закон управления, рассмотренный выше, на рис.3.2.

По схеме устройства рис.5.1 была построена структурно-имитационная модель, пример которой приведен на рис.5.2.

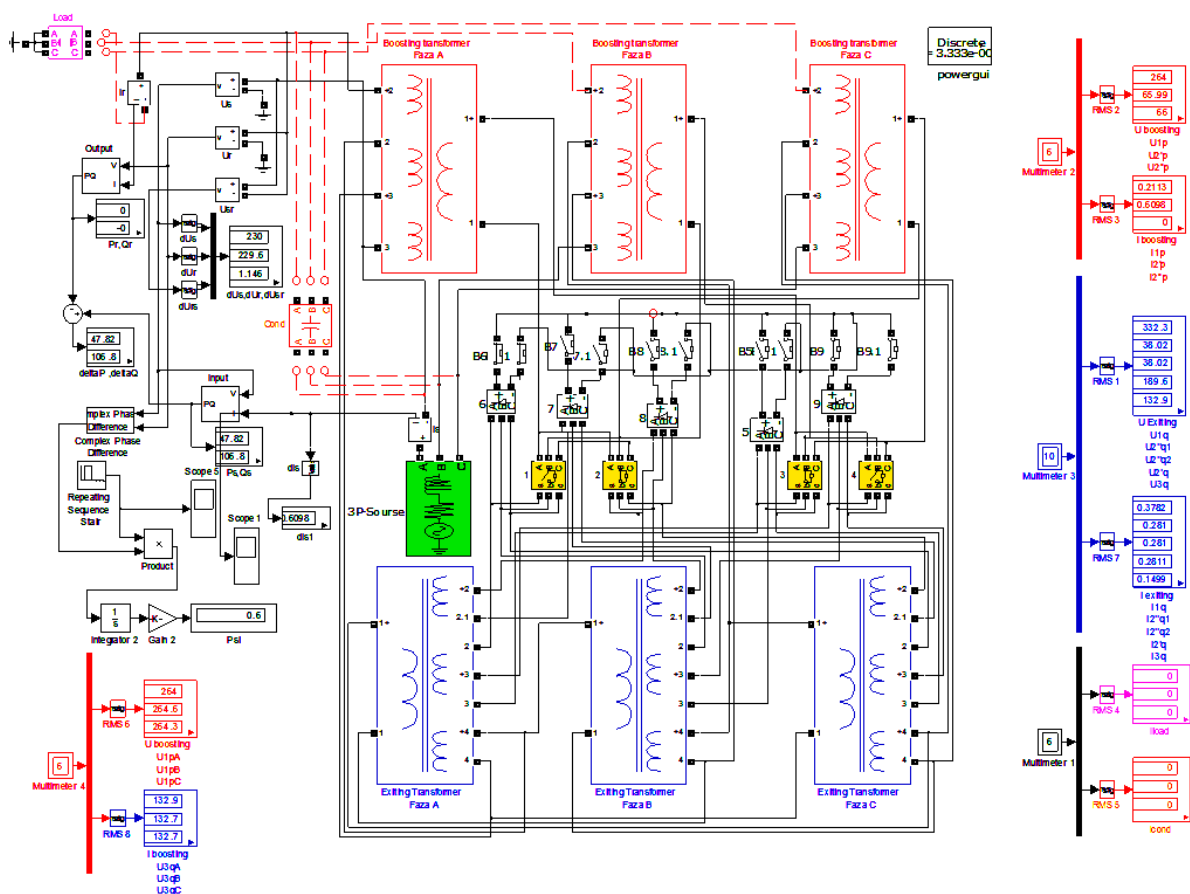


Рис.5.2. Структурно-имитационная модель ФРТ выполненного, в гексагональной конфигурации

На основе модели были проведены расчетные эксперименты, позволившие уточнить характеристики элементов устройства.

Для снижения установленной мощности фазорегулирующего трансформатора параллельно трансформатору был включен конденсатор (технология УПК ФРТ). Емкость конденсатора $C = 90 \text{ мкФ}$ принята из расчета примерно равного распределения тока нагрузки между трансформаторным и емкостным элементом УПК ФРТ.

Режимные параметры, рассчитанные для данной установки, приведены в таблице 5.1.

По данным таблицы 5.1 построены векторные диаграммы рис.5.3, иллюстрирующие работу устройства в режиме УПКФРТ на активную нагрузку при трех значениях угла фазового сдвига 0° , 30° и 60° .

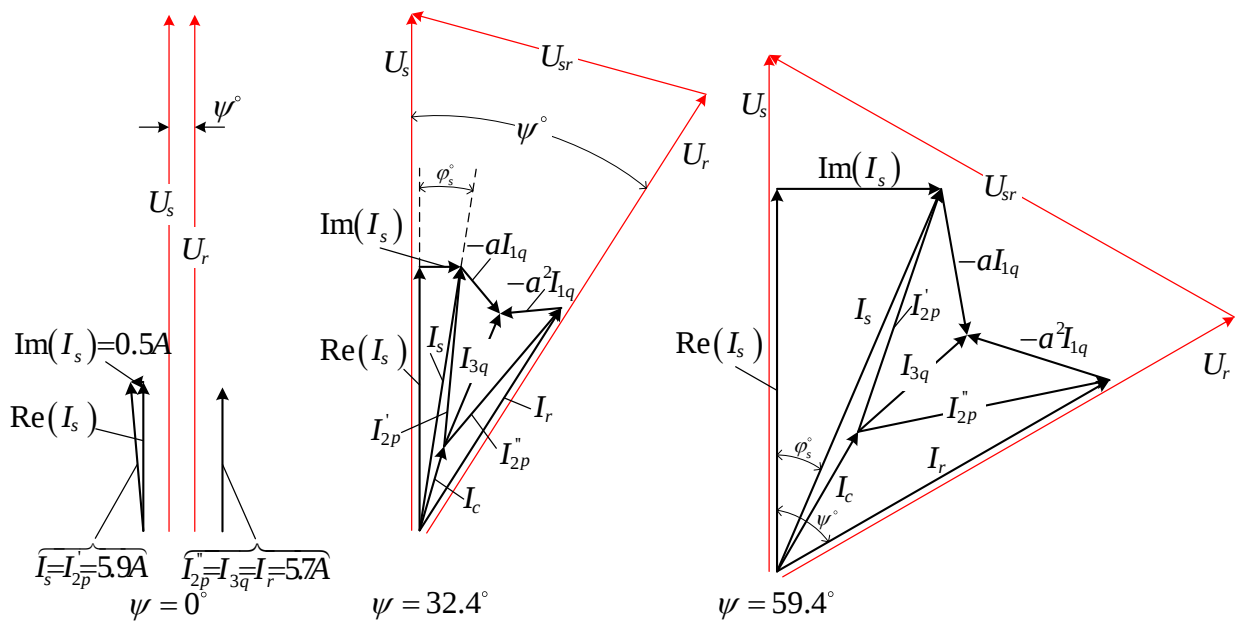


Рис.5.3. Векторная диаграмма токов и напряжений

На основании результатов расчетных экспериментов были определены уточненные энергетические показатели устройства:

Для параллельного трансформатора:

мощность первичной обмотки $S_{W_{1p}} = 265.5 \cdot 4.3 = 1141.7 \text{ BA}$;

мощность вторичных обмоток $S_{W_{2p}'} = 66.8 \cdot 10 = 668 \text{ BA}$; $S_{W_{2p}''} = 66.8 \cdot 9.9 = 661.3 \text{ BA}$;

установленная мощность параллельного трансформатора

$$S_p = \frac{S_{W_{1p}} + S_{W_{2p}'} + S_{W_{2p}''}}{2} = 1235.5 \text{ BA}.$$

Для последовательного трансформатора:

мощность первичной обмотки $S_{W_{1q}} = 332 \cdot 6 = 1992 \text{ BA}$;

мощность вторичных обмоток

$$S_{W_{2q1}'} = 38 \cdot 4.5 = 171 \text{ BA}; \quad S_{W_{2q1}''} = 38 \cdot 4.5 = 171 \text{ BA}; \quad S_{W_{2q}'} = 189.5 \cdot 4.5 = 825.8 \text{ BA};$$

$$S_{W_{3q}} = 132.8 \cdot 5.7 = 757 \text{ BA};$$

установленная мощность последовательного трансформатора

$$S_q = \frac{S_{W_{1q}} + S_{W_{2q1}'} + S_{W_{2q1}''} + S_{W_{2q}'} + S_{W_{3q}}}{2} = 1958.4 \text{ BA}.$$

выходная мощность устройства $S_r = U_r \cdot I_r = 228.5 \cdot 15 = 3427.5 \text{ BA}$;

установленная мощность устройства $S_{PST} = S_p + S_q = 3193.9 \text{ BA}$;

Таблица 5.1. Режимные параметры ФРТ выполненного в гексагональной конфигурации в режиме холостого хода и номинальной нагрузки

Позиция		1		2		3		4		5		6		7		8	
ψ_{ref}°	I	0.6		4.2		9.6		13.2		18.6		24.		27.6		31.2	
ψ°	L	0.6		4.8		10.2		13.8		19.2		22.8		28.2		32.4	
$U_{sr}(V)$	I	0.2		19.3		38.3		57.2		75.8		93.6		111.4		128.6	
	L	3.0		17.3		36.		54.4		72.5		90.4		107.9		125.	
$U_r(V)$	L	227.6		227.8		228.1		227.8		227.6		227.9		228.2		228.5	
$\Delta P(W)$	L	60.5		55.9		51.0		49.4		48.4		44.5		41.5		39.4	
$R_L(Ohm)$	L	40.8		36.2		32.6		29.5		27.0		24.9		23.2		21.7	
$I_r(A)$	L	5.6		6.3		7.0		7.7		8.4		9.2		9.8		10.5	
$I_c(A)$	I	0.0		0.5		1.1		1.6		2.1		2.6		3.1		3.6	
	L	0.1		0.5		1.		1.5		2.1		2.6		3.		3.5	
Параметры		$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$
W_{1p}	I	-265.5	0.2	-227.3	0.3	-188.9	0.5	-150.3	0.8	-111.9	1.0	-74.6	1.3	-37.	1.5	0.	1.7
	L	-265.2	2.9	-227.	3.0	-188.6	3.0	-150.4	3.1	-112.3	3.2	-74.5	3.3	-37.	3.4	0.	3.5
W_{2p}'	I	-66.4	0.5	-56.8	0.5	-47.1	0.9	-37.5	1.4	-27.8	2.0	-18.5	2.5	-9.1	3.0	0.4	3.5
	L	-66.8	5.9	-57.2	6.0	-47.7	6.1	-38.1	6.4	-28.6	6.5	-19.2	6.8	-9.8	7.0	0.8	7.3
W_{2p}''	I	-66.4	0.	-56.8	0.5	-47.1	1.1	-37.4	1.6	-27.8	2.1	-18.4	2.5	-9.	3.1	0.4	3.6
	L	-66.8	5.6	-57.3	5.8	-47.7	6.	-38.2	6.2	-28.7	6.4	-19.3	6.7	-9.9	6.9	0.8	7.2
W_{1q}	I	332.	0.3	331.8	0.3	331.	0.2	329.8	0.1	328.	0.3	325.7	0.5	322.8	0.8	319.4	1.1
	L	330.6	0.3	330.5	0.5	329.9	0.8	328.4	1.1	326.4	1.4	324.3	1.7	321.7	2.0	318.7	2.4
W_{2q1}''	I	38	0.2	38.	0.4	37.9	0.	37.8	0.	37.6	1.1	37.3	1.3	37.0	1.5	36.6	0.
	L	38.	2.7	38.	2.8	37.7	0.	37.6	0.	37.1	3.1	37.3	3.2	37.0	3.3	36.3	0.
W_{2q2}''	I	38.	0.2	38.	0.	37.9	0.	37.8	0.9	37.6	1.1	37.3	1.3	37.0	0.	36.6	0.
	L	38.	2.7	38.	0.	37.7	0.	37.4	3.0	37.1	3.1	37.3	3.2	36.7	0.	36.3	0.
W_{2q}'	I	189.5	0.2	189.3	0.4	188.9	.6	188.2	0.9	187.2	1.1	186.1	0.	184.5	0.	182.6	0.
	L	189.2	2.7	189.1	2.8	188.6	2.9	187.7	3.0	186.5	3.1	184.6	0.	183.	0.	181.1	0.
W_{2q}	I	132.8	0.1	132.8	0.5	132.5	1.0	132.1	1.5	131.4	1.9	130.5	2.3	129.4	2.6	128.1	2.9

	L	131.7	5.7	131.6	5.7	131.3	5.7	130.6	5.7	129.7	5.7	128.8	5.7	127.6	5.7	126.3	5.7
Позиция		9		10		11		12		13		14		15			
ψ_{ref}°	I	36.6		40.2		45.6		49.2		53.4		57.		60.6			
ψ°	L	36.0		41.4		45.		48.6		52.2		55.8		59.4			
$U_{sr}(B)$	I	145.4		161.6		177.1		192.		206.2		219.8		232.8			
	L	141.1		156.6		171.		185.7		199.7		212.5		224.6			
$U_r(B)$	L	228.2		228.		227.8		228.1		228.4		228.2		228.			
$\Delta P(Bm)$	L	42.5		46.8		53.0		55.0		58.2		67.4		78.2			
$R_L(Ом)$	L	20.3		19.2		18.2		17.4		16.6		15.9		15.2			
$I_r(A)$	L	11.2		11.9		12.5		13.1		13.8		14.4		15.			
$I_c(A)$	I	4.1		4.6		5.		5.4		5.8		6.2		6.6			
	L	4.0		4.4		4.8		5.2		5.5		6.		6.4			
Параметры		$U(V)$		$I(A)$		$U(V)$		$I(A)$		$U(V)$		$I(A)$		$U(V)$		$I(A)$	
W_{1p}	I	36.3	1.9	71.7	2.1	105.8	2.3	139.1	2.5	171.3	2.6	202.4	2.7	232.2	2.8		
	L	35.6	3.6	70.2	3.7	102.6	3.8	135.7	3.9	167.7	4.0	197.6	4.1	226.1	4.3		
W_{2p}'	I	9.3	3.9	18.1	4.4	26.6	4.8	34.9	5.2	43.	5.6	50.7	5.9	58.2	6.2		
	L	8.3	7.6	16.9	7.9	25.	8.3	33.2	8.6	41.2	9.1	48.7	9.5	55.8	10.		
W_{2p}''	I	9.4	4.1	18.2	4.6	26.8	5.	35.1	5.4	43.2	5.8	51.	6.2	58.4	6.6		
	L	8.1	7.5	16.7	7.8	24.8	8.2	33.0	8.5	41.	9.0	48.4	9.4	55.5	9.9		
W_{1q}	I	315.9	1.4	312.1	1.7	308.1	2.1	303.4	2.4	298.6	2.8	293.8	3.2	289.	3.6		
	L	315.	2.9	311.	3.3	306.9	3.8	302.7	4.2	298.3	4.8	293.5	5.4	288.6	6.		
W_{2q1}''	I	36.3	0.	35.8	2.1	35.4	2.2	34.9	2.3	34.3	0.	33.8	0.	33.2	2.7		
	L	35.9	0.	35.1	3.7	35.3	3.9	34.8	3.9	33.8	0.	33.3	0.	32.2	4.5		
W_{2q2}''	I	36.3	1.8	35.8	2.1	35.4	2.2	34.9	0.	34.3	0.	33.7	2.6	33.2	2.7		
	L	35.6	3.6	35.1	3.7	35.3	3.9	34.4	0.	33.8	0.	32.8	4.3	32.2	4.5		
W_{2q}'	I	180.7	0.	178.6	0.	176.6	2.2	174.	2.4	171.3	2.5	168.6	2.6	165.9	2.7		
	L	178.9	0.	176.5	0.	173.1	3.9	170.5	4.0	167.7	4.2	164.8	4.3	161.7	4.5		
W_{3q}	I	126.8	3.1	125.3	3.4	123.7	3.5	121.9	2.7	120.	3.7	118.1	3.8	116.2	3.8		
	L	124.7	5.7	123.	5.7	121.2	5.7	119.4	5.7	117.5	5.7	115.5	5.7	113.3	5.7		

соотношение между мощностью ФРТ и выходной мощностью $\frac{S_{PST}}{S_r} = 0.93BA ;$

Установленная мощность конденсаторной батареи $S_c = I_c \cdot U_{sr} = 6.6 \cdot 232.8 = 1536.5BA ;$

Соотношение между мощностью батареи конденсатора и выходной мощностью ФРТ

$$\frac{S_c}{S_r} = 0.45.$$

Мощность силовых ключей $\frac{S_{W_{1p}}}{S_r} = 0.33.$

Из анализа энергетических характеристик ФРТ можно сделать вывод об эффективности технологии УПКФРТ с точки зрения оптимизации массогабаритных показателей.

5.1.2. Уточнение параметров и характеристик лабораторного образца

По результатам расчетных экспериментов, описанных в п.5.1.1. были уточнены точные данные и параметры обмоток лабораторного образца, которые приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Характеристики лабораторного образца.

Трансформатор	последовательный (<i>q</i>)					параллельный (<i>p</i>)		
сеч-е серд. $мм^2$	67					53		
мощность $P, Вт$	1958					1235		
обмотка	W_{1q}	W_{2q1}''	W_{2q2}''	W_{2q}'	W_{3q}	W_{1p}	W_{2p}'	W_{2p}''
напряжение $U, В$	332	38	38	189.5	132.8	265.5	66.8	66.8
ток $I, А$	6	4.5	4.5	4.5	5.7	4.3	10	10
кол. витков, <i>шт.</i>	157	18	18	89	63	156	39	39
диам. пров., <i>мм</i>	1.7	1.5	1.5	1.5	1.7	1.47	2.2	2.2

По уточненным данным были спроектированы и изготовлены трансформаторные элементы лабораторного образца ФРТ, состоящего из шести однофазных трансформаторов, составляющих две трехфазные группы.

5.1.3. Тестирование элементов устройства в режимах холостого хода и короткого замыкания

Каждый из шести трансформаторов был изготовлен и испытан отдельно в режиме холостого хода и в режиме короткого замыкания.

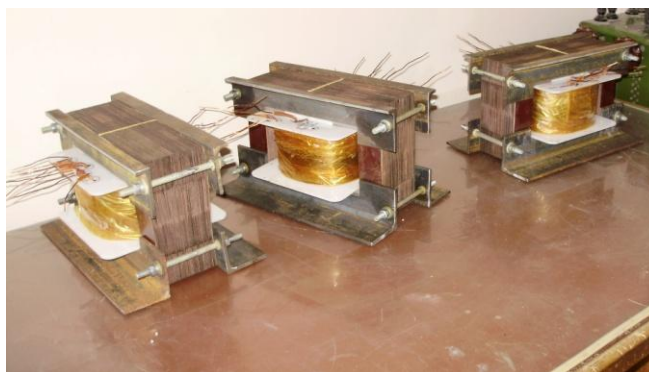


Рис.5.4. Возбуждающие трансформаторы ФРТ

Результаты испытаний возбуждающих трансформаторов рис.5.4 представлены в таблице 5.3 ниже.

Таблица 5.3. Результаты испытаний возбуждающих трансформаторов установки

U, B	0	50	100	150	200	225	250	275	300	310	320	330	340	350
$T1$														
I, A	0	0.01	0.03	0.06	0.13	0.18	0.26	0.36	0.54	0.66	0.82	1.11	1.42	1.78
P, Bm	0	2	7	10	13	17	21	26	33	36	42	49	55	66
$T2$														
I, A	0	0.01	0.04	0.07	0.14	0.19	0.27	0.38	0.56	0.67	0.8	1.07	1.39	1.73
P, Bm	0	2	7	10	14	17	20	26	33	37	41	50	55	65
$T3$														
I, A	0	0.01	0.04	0.06	0.12	0.17	0.25	0.34	0.52	0.6	0.72	0.88	1.12	1.36
P, Bm	0	2	7	10	13	16	20	25	31	34	38	43	52	55

На рис.5.5 и 5.6 приведены кривые тока холостого хода каждого возбуждающего элемента и активные потери в зависимости от приложенного напряжения соответственно.

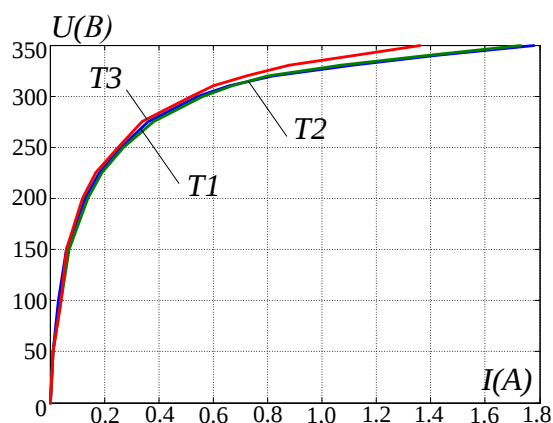


Рис.5.5. Кривые тока каждого возбуждающего элемента в режиме холостого хода

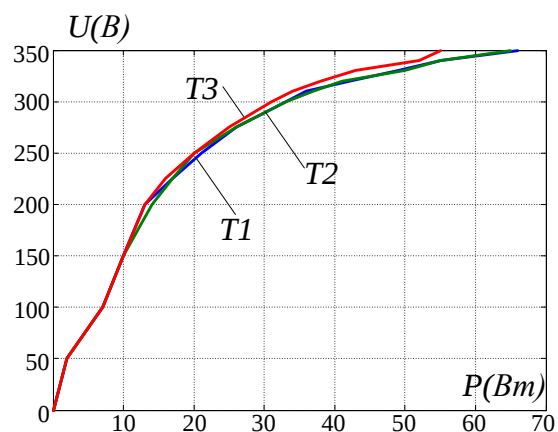


Рис.5.6. Потери в трансформаторах при изменении напряжения

Из рис.5.5, и рис.5.6 видно, что все три трансформатора, имеют близкие характеристики, и при рабочем напряжении потери не превышают 2,5%.

В качестве следующего шага были изготовлены последовательные трансформаторы (см. рис.5.7).

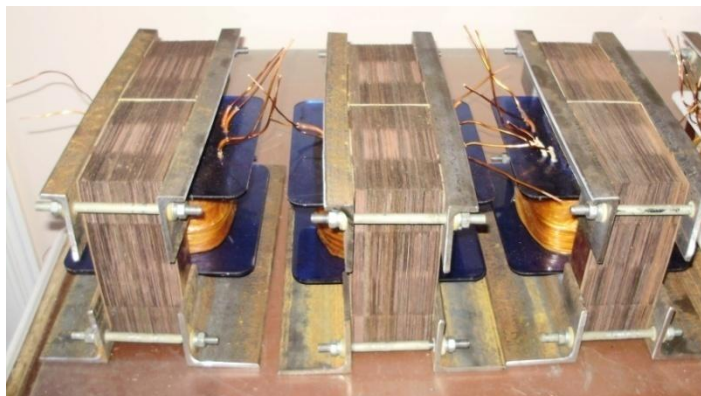


Рис.5.7. Последовательные трансформаторы фазовой установки

В таблице 5.4 приведены результаты испытаний последовательных трансформаторов лабораторного образца.

Таблица 5.4. Результаты испытаний последовательных трансформаторов

U, B	0	50	100	150	200	220	240	250	260	265	270	280
$T1$												
I, A	0	0.02	0.05	0.1	0.24	0.33	0.45	0.55	0.68	0.76	0.87	1.15
P, Bm	0	3	7	14	17	20	25	26	31	33	38	40
$T2$												
I, A	0	0.02	0.05	0.1	0.23	0.32	0.44	0.55	0.67	0.78	0.86	1.14
P, Bm	0	3	10	14	18	20	25	27	32	34	35	42
$T3$												
I, A	0	0.02	0.04	0.09	0.21	0.28	0.4	0.48	0.57	0.64	0.74	0.96
P, Bm	0	3	7	13	17	19	24	27	30	32	34	39

Зависимости тока холостого хода и потерь последовательных трансформаторов рис.5.8 и рис.5.9 соответственно.

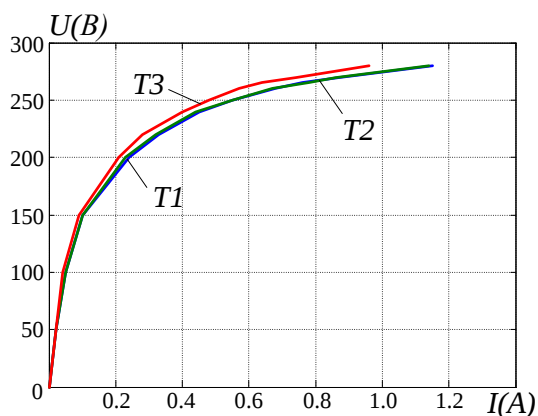


Рис.5.8. Зависимости тока холостого хода

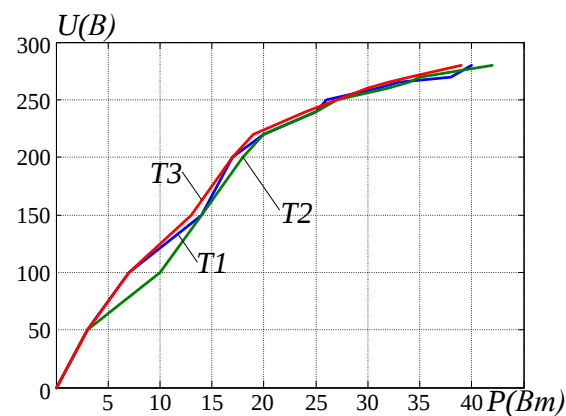


Рис.5.9. Кривые изменения потерь в функции входного напряжения трансформаторов

Из рис.5.8 и рис.5.9 видно, что ток не превышает 0,8А и потери составляют менее 2,5% при максимальном рабочем напряжении этих трансформаторов 265В, что говорит о высоком качестве изготовленных элементов. Таким образом испытания показали, что все трансформаторы изготовлены качественно, все обмотки соответствуют их расчетным параметрам.

5.2.Компоненты (модули) лабораторного образца

5.2.1. Изготовление и испытания силового модуля

Лабораторную модель было принято решение изготовить в модульной компоновке каждой фазы устройства. Это означает, что один параллельный и один последовательный трансформаторы объединяются в один модуль. Силовой модуль в сборе представлен на рис.5.10.



Рис.5.10. Силовой модуль в сборе

Все фазы силового модуля соединяется разъемами между собой и с электронным модулем, который обеспечивает регулирование угла фазового сдвига. Принципиальная схема соединений приведена на рис.5.11.

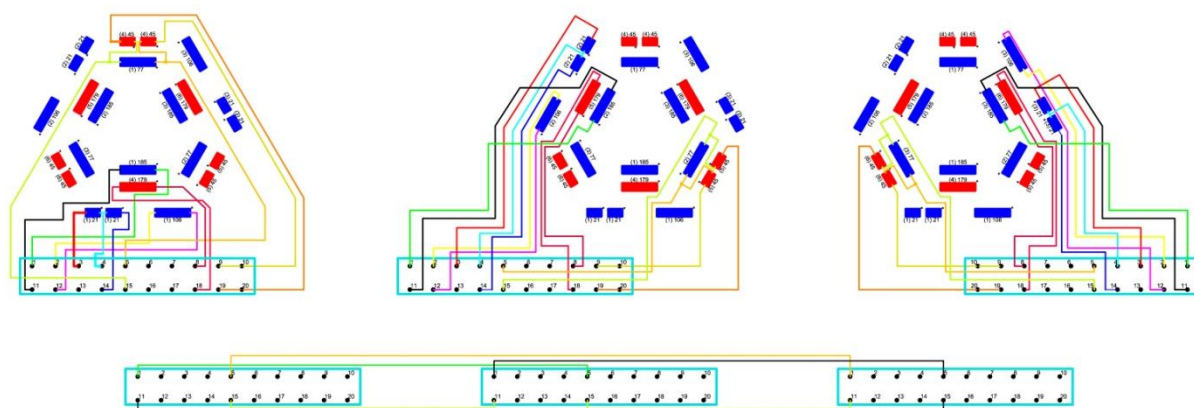


Рис.5.11. Принципиальная схема связи между силовыми блоками и электронным модулем

Были проведены испытания силовой части в 3-х фазном исполнении при изменении фазового сдвига от 0 до 60 градусов для режимов холостого хода и короткого замыкания. Результаты испытаний в режиме холостого хода приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5. Основные параметры установки при изменении фазового сдвига

Поз.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ψ_s	0	4.2	9.6	13.2	18.6	24	27.6	31.2	36.6	40.2	45.6	49.2	53.4	57	60.6
ψ_r	1.36	6	10.6	15.3	19.79	24.5	28.8	33.1	37.4	41.6	45.8	49.5	53.5	57	60.3
I_{int}, A	1.85	1.42	1.2	1.13	1.03	0.97	0.9	0.85	0.79	0.72	0.69	0.67	0.68	0.72	0.83
U_{int}, B	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
U_{ies}, B	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222
U_{sr}, B	5.6	23.3	41	59	76	94	110	126	142	157	172	185	199	211	222
P, Bm	56	46	41	36	34	30	27	26	27	27	29	31	31	34	39

На рис.5.12 представлено изменение входного тока установки в зависимости от сдвига фаз. Из этого рисунка видно, что максимальный ток холостого хода имеет место при сдвиге фаз равной 0°.

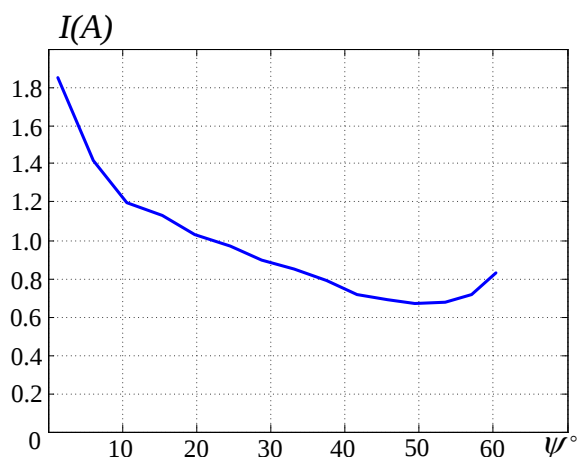


Рис.5.12. Изменение тока в зависимости от сдвига фаз

На рис.5.13 показана характеристика потерь холостого хода в функции от величины угла сдвига фаз. Как видно из рис.5.13 минимальные потери достигаются при углах фазового сдвига близких к 30°.

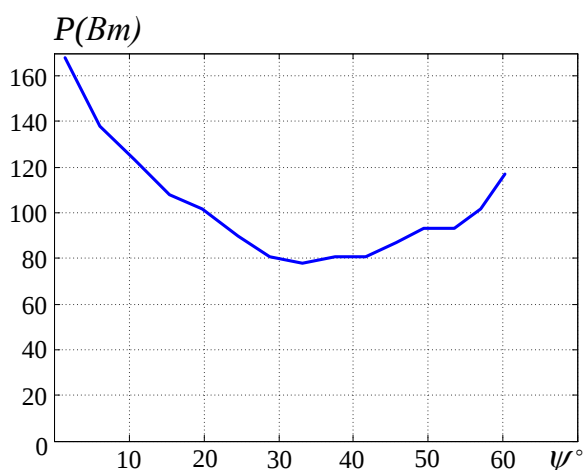


Рис. 5.13. Потери установки в зависимости от угла сдвига фаз

Также важными характеристиками устройства являются параметры режима короткого замыкания. Результаты испытаний объекта в режиме короткого замыкания приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6. Основные параметры установки для режима короткого замыкания (ток короткого замыкания 12А равный номинальному)

Поз.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U_{sc}, B	15.9	15.2	15.7	16.1	16.3	14.8	13.6	13.7	13.7	14.1	14.8	15	15	15.3	16
P_{sc}, Bm	190	180	184	190	192	178	162	160	158	164	178	184	184	190	198
U_{sr}, B	11.45	11.5	11.5	11.9	12.1	10.4	10.6	10.7	11.1	11.5	13.2	13	13	13.5	13.8

На рис.5.14 и рис.5.15 приведены характеристики напряжения и потерь короткого замыкания в процессе регулирования угла фазового сдвига.

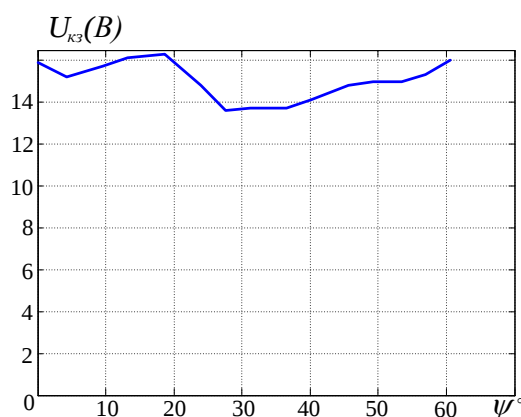


Рис.5.14. Кривая напряжения короткого замыкания в зависимости от угла сдвига фазы

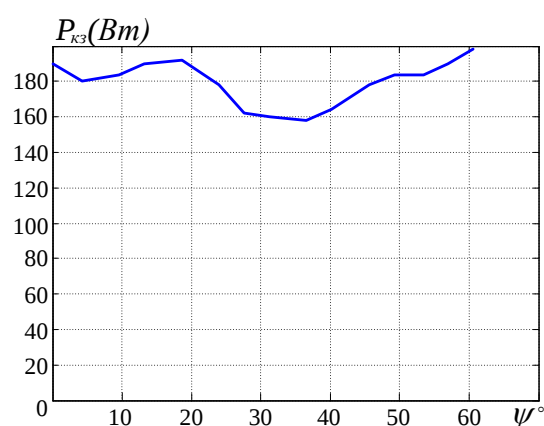


Рис.5.15. Кривая потерь в установке для режима короткого замыкания

Из рис.5.14 и рис.5.15 видно, что на всем диапазоне регулирования потери примерно одинаковы. Суммарные потери не превышают 600Вт для всей установки. Это означает, что для максимальной нагрузки установка будет иметь КПД не менее 94%.

Результаты проведенных испытаний подтвердили правильность принятых технических решений.

5.2.2. Модернизация электронного блока коммутации и стратегии управления

На следующем этапе была разработана и реализована схема устройства с усовершенствованным электронным блоком коммутации сдвига фаз. Этот модуль содержит управляемые ключи и диоды (рис.5.16). Использование диодов позволило упростить управление электронными модулями и уменьшить стоимость устройства. Следует отметить, что эта схема имеет дополнительное преимущество, заключающееся в снижении номинальной мощности электронного модуля.

Количество ступеней и их дискретность были выбраны из соображений, чтобы не превышать допустимый уровень гармоник и обеспечить диапазон сдвига фазы от 0° до 60°

5.2.3. Разработка блоков управления

Для того, чтобы выбрать нужный угол фазового сдвига, был разработан электронный модуль (рис.5.18), который с помощью клавиатуры позволил реализовывать соответствующее состояние устройства согласно с алгоритмом переключения, показанным на рис.5.17.



Рис.5.18. Физическая реализация электронного модуля для выбора угла фазового сдвига

Величина выбранного угла фазового сдвига отображается на цифровом индикаторе.

Была разработана и реализована схема электронного ключа, на базе транзисторов типа IRGB, физическое исполнение этого модуля показано на рис.5.19.

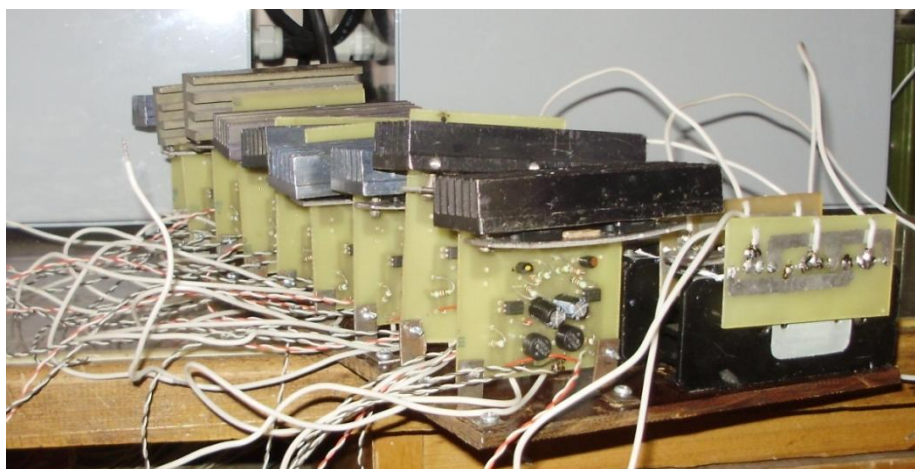


Рис.5.19. Физическая реализация модулей электронного ключа

Применение схемы, реализованной на транзисторах IRGB, имеет преимущество по сравнению с применением тиристоров, потому что транзисторы могут быть открыты и закрыты в любой момент времени, что облегчает процесс управления ключами питания. После тестирования на структурно-имитационных моделях электронный модуль был доработан и собран (рис.5.20).

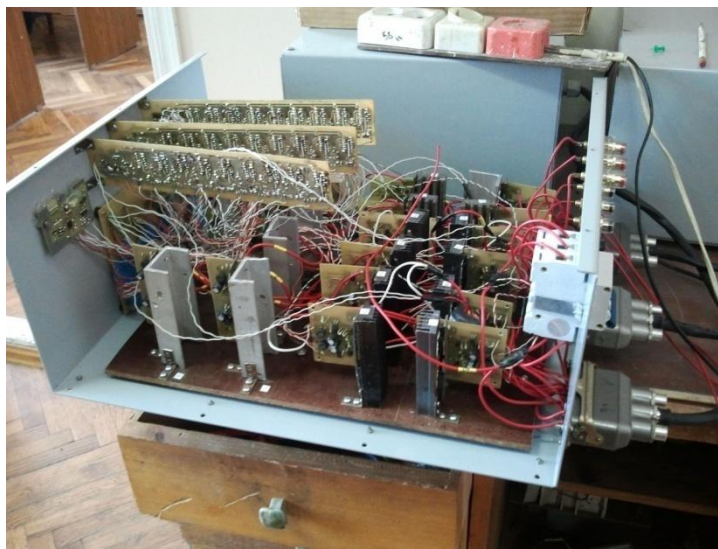


Рис.5.20. Общий вид электронного модуля

Были разработаны и собраны модули синхронизации. Для тестирования этих модулей также были использованы электронные ключи, подключенные к нагрузке 1кВт. Для проверки момента включения/выключения электронного ключа были использованы преобразователи тока, через которые ток изменяется с помощью автотрансформатора. Таким образом, при подаче управляющего сигнала из блока выбора величины угла фазового сдвига в модуль синхронизации он передавался на электронный ключ только тогда, когда ток через преобразователь тока был меньше 0,3А, т.е. около нуля. Использование этих модулей синхронизации позволило избежать перенапряжений и режимов, близких к короткому замыканию.

Испытания показали, что разработанный электронный модуль выполняет заданные функции. Следующим шагом была разработана схема подключения всех модулей устройства (рис. 5.21).

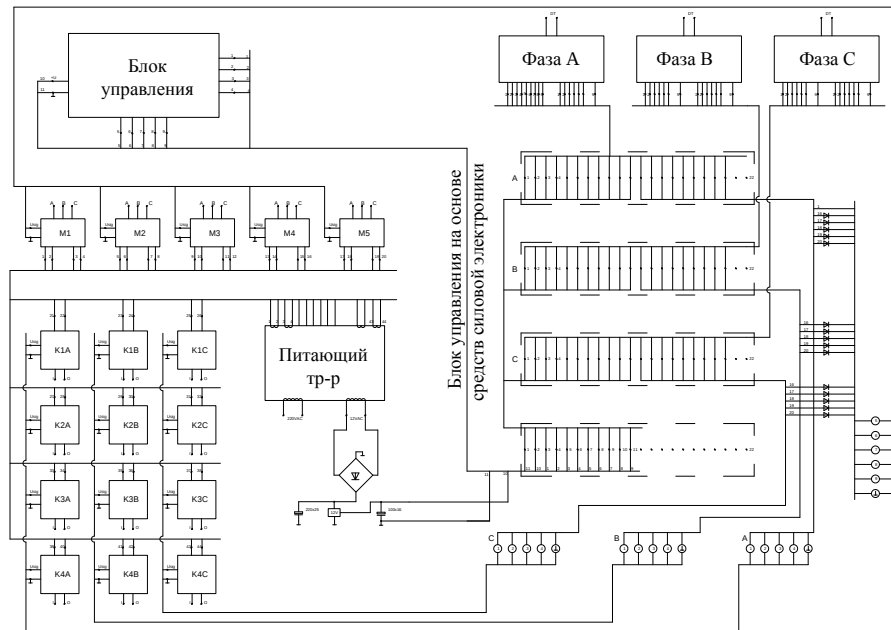


Рис.5.21. Схема взаимосвязей между модулями

Силовые модули были подключены через специально изготовленные разъемы, что позволило легко отсоединять любой блок в установке. Электронный модуль был оснащен входными и выходными контактами, а также автоматической защитой от короткого замыкания.

5.3. Комплексные испытания лабораторной установки

5.3.1. Общий вид установки

Общий вид лабораторной установки показан на рис.5.22. Установка состоит из 4 модулей: 3 силовых модуля по 3 кВт каждый (фаза А, фаза В и фаза С) и электронного модуля, который позволяет управлять углом фазового сдвига. Для фиксации процесса регулирования во времени был применен цифровой осциллограф.

На заключительном этапе было проведено комплексное испытание лабораторного образца, номинальной мощностью 10 кВт.

Установка питалась через регулятор напряжения для обеспечения переменного напряжения в диапазоне от 0 до 380В во избежание повреждения установки в случае неисправности. В качестве активной нагрузки были использованы нагреватели мощностью 3,3 кВт для каждой фазы.



Рис.5.22. Общий вид лабораторного образца, номинальной мощностью 10 кВт

На начальном этапе конденсаторные батареи, шунтирующие ФРТ, не были подключены.

5.3.2. Испытание установки на активную нагрузку

Результаты тестирования образца при работе на активную нагрузку приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7. Результаты теста установки на активную нагрузку 10 кВт

Шаг	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ψ_s°	0.6	4.2	9.6	13.2	18.6	24	27.6	31.2	36.6	40.2	45.6	49.2	53.4	57	60.6
ψ_r°	0.6	4.2	9.0	13.8	18	22.8	27.6	31.8	36	40.2	43.8	48	51.6	55.2	58.8
U_s, B	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
U_r, B	222.3	223	223.7	223.2	222.7	223.4	224.1	224.6	224.2	223.7	223.1	223.7	224.2	223.7	223.3
U_{sr}, B	8.9	16	33.9	51.9	69.8	87.9	105.5	122.6	138.5	153.9	168	182.7	196.7	209.6	221.6
I_s, A	14.1	14.1	14.7	14.0	13.96	14	14.05	14.1	14.09	14.07	14.06	14.1	14.15	14.13	14.11
I_r, A	13.9	13.9	13.98	13.95	13.92	13.96	14	14.04	14.01	13.98	13.95	13.98	14.01	13.98	13.96
P_s, Bm	3243	3234	3228	3209	3201	3212	3223	3235	3234	3232	3229	3241	3252	3247	3244
$Q_s, BA\rho$	190	189	186.4	183.4	187.6	182.6	178.9	170.9	159.6	145.9	137.5	123.6	114.2	117.2	120.2
P_r, Bm	3089	3108	3126	3112	3099	3120	3137	3154	3140	3127	3112	3127	3141	3129	3117
$Q_r, BA\rho$	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

На рис.5.23 показано сравнение заданного угла сдвига фаз и полученного в действительности в режиме номинальной нагрузки установки.

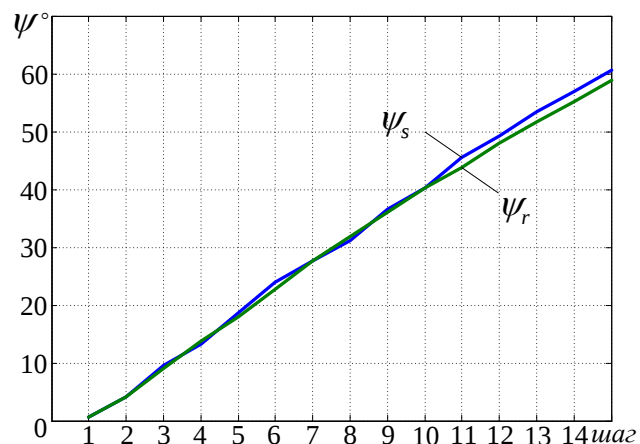


Рис.5.23. Кривые заданного угла сдвига фаз и полученного в реальности

Анализируя рис.5.23 и данные из таблицы 5.7, можно констатировать, что разница между заданным и действительным углом сдвига фаз не превышает 2,97%.

График изменения выходного напряжения установки при изменении фазового сдвига в диапазоне $0^\circ \div 60^\circ$ при полной нагрузке показано на рис.5.24. Можно сказать, что выходное напряжение не падает более чем на 3,5%, т.е. остается в допустимых пределах.

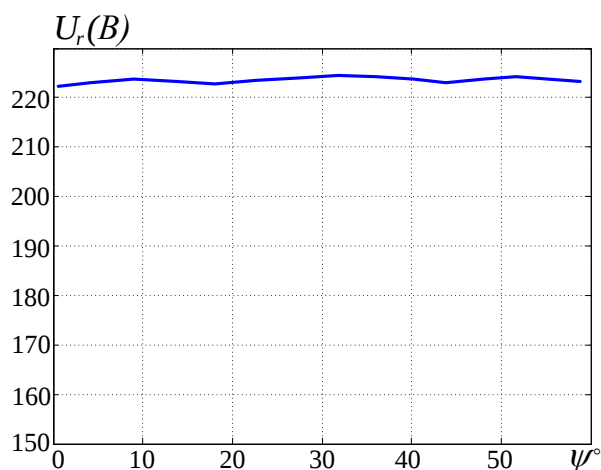


Рис.5.24. Изменение выходного напряжения при изменении угла сдвига от 0° до 60° , при номинальной нагрузке 10 кВт

На рис.5.25 приведены зависимости активных и реактивных потерь мощности в процессе регулирования угла фазового сдвига.

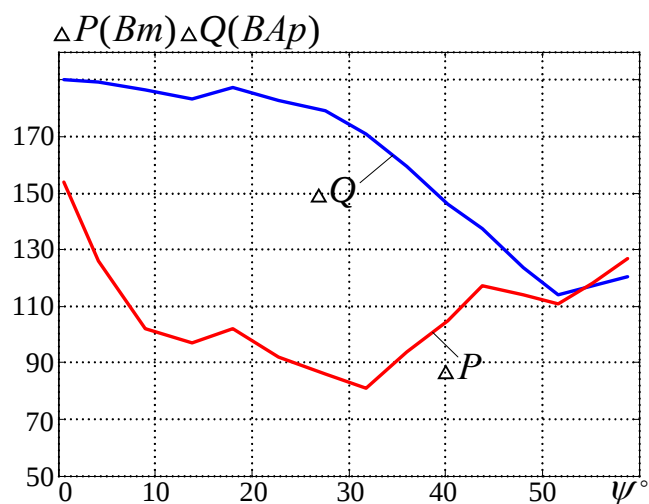


Рис.5.25. Кривые активных и реактивных потерь мощности в процессе регулирования угла фазового сдвига

В этом случае уровень активных потерь не превышает 4,5% для малых углов и 3,5% для больших углов.

5.3.3. Испытание установки на активную нагрузку с использованием шунтирующего конденсатора емкостью 90 мкф

Результаты, полученные для активной нагрузки (нагреватели) 3,3 кВт на каждую фазу, представлены в таблице

Таблица 5.8. Результаты испытаний установки на 10 кВт с использованием конденсаторной батареи 90 мкФ

Шаг	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ψ_s°	0.6	4.2	9.6	13.2	18.6	24	27.6	31.2	36.6	40.2	45.6	49.2	53.4	57	60.6
ψ_r°	0.6	4.2	9	13.8	18	22.8	27.6	31.8	36	40.2	44.2	48	52	55.8	59.6
U_s, B	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
U_r, B	222.2	223.1	224	223.7	223.5	224.4	225.1	225.7	225.6	225.5	225.4	226	227	227	227
U_{sr}, B	9.11	16.1	35	52	70.3	88.4	106	123	139	155	169	184	198	211	224
I_s, A	14.25	14.23	14.2	14.1	14.05	14.1	14.17	14.25	14.3	14.4	14.5	14.7	14.96	15.2	15.45
I_r, A	13.9	13.9	14	14	13.97	14	14.07	14.1	14.1	14.1	14.1	14.13	14.16	14.16	14.17
I_c, A	0.34	0.52	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.38	4.79	5.2	5.6	6	6.33
P_s, Bm	3270	3268	3265	3244	3231	3241	3250	3259	3256	3254	3254	3267	3280	3284	3290
Q_s, BAr	168	139.2	91	29	-42	-133	-235	-351	-471	-601	-732	-883	-1039	-1190	-1343
P_r, Bm	3085	3110	3134	3127	3122	3146	3166	3185	3181	3178	3175	3193	3209	3209	3211
Q_r, BAr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_c, Bm	-29	93	215	330	443	556	663	764	854	938	1012	1086	1153	1209	1259
Q_r, BAr	-52	-48	-55	-79	-111	-146	-191	-242	-303	-368	-435	-505	-578	-654	-723

Продолжение Таблицы 5.8.

Шаг	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I_{pst}, A	13.91	13.71	13.2	12.6	12.05	11.6	11.17	10.75	10.3	10.02	9.71	9.5	9.36	9.2	9.12
P_{pst}, Bm	3299	3175	3050	2914	2788	2685	2587	2495	2402	2316	2242	2181	2127	2075	2031

На рис.5.26 показано изменение токов при регулировании угла фазового сдвига.

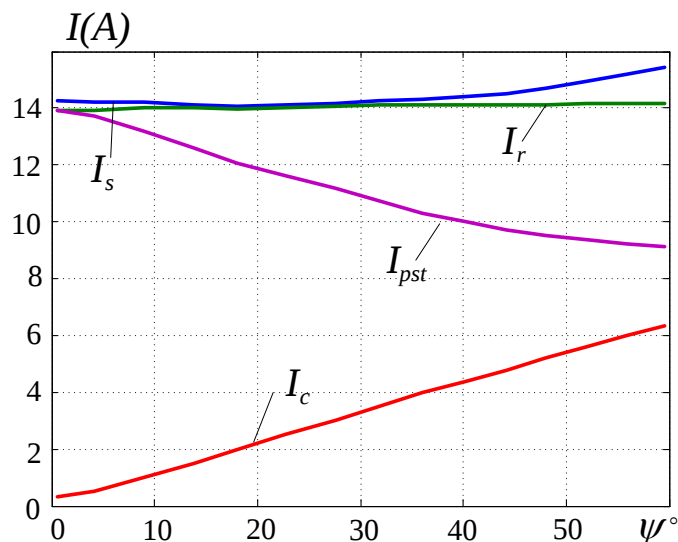


Рис.5.26. Зависимость входного тока I_s , выходного тока (нагрузки) I_r , входного тока установки I_{pst} и тока конденсатора I_c от углов сдвига фаз

Из рис.5.26 видно, что по мере увеличения фазового сдвига, входной ток установки уменьшается, а ток через конденсаторную батарею увеличивается. Ток в нагрузке поддерживается постоянным на уровне 14А. Это подтверждает эффективность применения технологии УПКФРТ, позволяющей снизить номинальную мощность трансформатора примерно в два раза при использовании конденсаторной батареи. Значение конденсаторной батареи выбрано в 90мкФ для обеспечения деления тока на две равные части. Поскольку стоимость конденсаторов существенно меньше стоимости трансформаторного оборудования, предлагаемое техническое решение может быть экономически оправданным. Для этого случая на рис.5.27 показано перераспределение функции активной и реактивной мощности при изменения фазового сдвига.

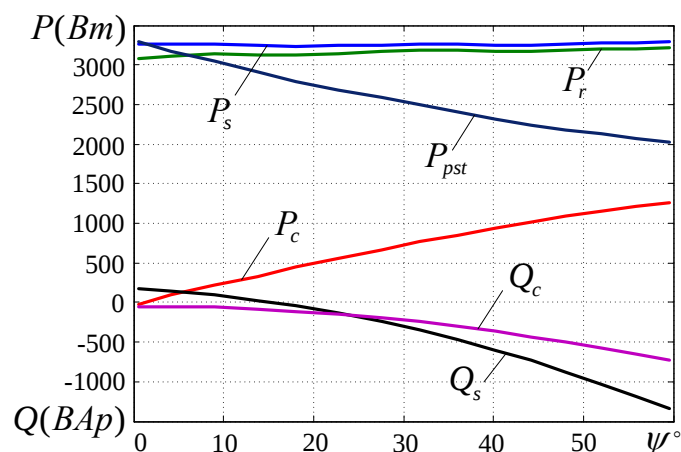


Рис.5.27. Графики активной и реактивной мощности в зависимости от изменения фазового сдвига

где:

P_s - активная мощность, потребляемая от сети,

P_r - активная мощность, потребляемая нагрузкой,

P_c - активная мощность, передаваемая через конденсаторную батарею,

P_{pst} - активная мощность, передаваемая через установку,

Q_s - реактивная мощность от сети,

Q_c - реактивная мощность, прошедшая через конденсаторную батарею.

Максимальные значения емкости конденсаторов, которые можно использовать как полезные, ограничены номинальной мощностью установки и выбираются из условия прохождения половины тока, потребляемого нагрузкой.

5.4. Выводы по пятой главе

1. Создана и апробирована структурно-имитационная модель устройства, на основе которой проведены расчетные эксперименты, позволившие уточнить характеристики лабораторного образца: числа витков обмоток силовых модулей, сечения проводников, параметры магнитной системы, энергетические характеристики.

2. На основе уточненных параметров были изготовлены однофазные силовые модули устройства, тестирование которых в различных режимах показало идентичность их характеристик и позволило сделать вывод о возможности их применения в качестве составляющих лабораторного образца.

3. Разработана схема соединения силовых и электронных модулей, которая позволила скомпоновать силовой модуль устройства.

4. Были проведены испытания силового модуля в режимах холостого хода и короткого замыкания в процессе изменения угла в диапазоне от 0° до 60° , показавшие корректность изготовления и работы обмоток регулирования, позволившие оценить КПД изготовленного устройства равный 94%.

5. Разработана и реализована схема устройства с усовершенствованным электронным блоком коммутации, которая позволила сократить количество электронных ключей по сравнению с прототипом, обеспечить шаг переключения $4,2^\circ$ в диапазоне 0° - 60° при допустимом уровне гармоник. Работоспособность схемы и закона управления была подтверждена имитационным моделированием и результатами тестирования лабораторного образца.

6. Разработана принципиальная схема электронного силового ключа, основанная на транзисторах типа IGBT, которая позволила с помощью модулей синхронизации осуществлять требуемые коммутационные операции в любой момент времени. Итогом стало изготовление работоспособного электронного модуля.

7. Проведено комплексное тестирование лабораторного образца, позволившее сделать вывод об эффективности принятых технических решений (применение технологии УПКФРТ, усовершенствование схемы коммутации и закона управления), которые позволили существенно уменьшить массогабаритные показатели ФРТ и оптимизировать процесс регулирования.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Для решения вопросов повышения степени управляемости в настоящее время в мире предлагается концепция "интеллектуальных" сетей, которая является частью энергетических программ ведущих стран. В процессе разработки и внедрения концепции SMART GRID существенно возрастает роль устройств FACTS, в частности, ФРТ. Фазорегулирующие трансформаторы могут применяться в энергосистемах для решения следующих задач: управления режимами межсистемных и межгосударственных связей; реализации оптимальных сценариев загрузки линий электропередач; плавки гололеда и профилактического прогрева проводов ВЛ; построения новых FACTS контроллеров, управляемых с помощью ФРТ; эффективного управления переходными режимами и повышения запаса устойчивости и улучшения качества электроэнергии.

2. Рассмотрена специфика фазорегулирующих устройств трансформаторного типа, проанализированы различные способы получения вольтодобавочного напряжения для регулирования угла фазового сдвига (поперечное регулирование, продольно-поперечное регулирование и симметричное регулирование). Показана связь между способами создания вольтодобавочного напряжения и допустимыми диапазонами регулирования по углу. Определены критерии, влияющие на выбор схемного варианта и компоновки ФРТ. Сделан обзор наиболее распространенных существующих схем ФРТ зависящих от номинального напряжения, проходной мощности и требуемой величины угла фазового сдвига.

3. Проанализирован опыт разработки, изготовления и применения ФРТ в мировой практике. Показано, что задача разработки и исследования новых технических решений в этой области является актуальной и значимой.

4. Предложен и описан методологический аппарат, примененный для исследования схемных вариантов ФРТ. Определены правила и приемы, позволяющие получить объективные результаты и снизить риск ошибочных и непроизводительных действий. Разработаны критерии оценки для сравнительного анализа объектов исследования.

5. Для обеспечения необходимых рабочих условий предложена система секционирования обмоток управления, позволившая обеспечить различное количество позиций регулирования угла фазового сдвига. Разработаны и апробированы законы переключения силовыми ключами, реализующие требуемую стратегию управления. Показано, что как вариант регулирования при помощи РПН, так и вариант управления при помощи средств силовой электроники дают одинаковые результаты по всем основным

режимным и энергетическим характеристикам. Применение быстродействующего управления, обеспечиваемого силовыми ключами дает ряд преимуществ, позволяющих использовать устройство в качестве активного элемента современных Smart Grid систем.

6. Для исследования выбраны семь новых схемных вариантов ФРТ. Для трех объектов исследования построены математические модели, позволившие определить соотношения между режимными параметрами в процессе регулирования угла фазового сдвига. Для каждого ФРТ в среде Matlab/Simulink были созданы SPS – модели. Расчетные эксперименты, выполненные на их основе позволили определить характеристики объектов в различных режимах. Сравнительный анализ режимных характеристик, полученных как при математическом, так и при структурно-имитационном моделировании, показал близость полученных результатов.

7. Предложен способ снижения установленной мощности, основанный на использовании конденсаторной батареи, подключенной между входными и выходными зажимами ФРТ (технология УПКФРТ). Определены оптимальные параметры конденсаторных батарей. Показана эффективность предлагаемого технического решения (емкостной передачи части мощности), позволившего существенно уменьшить типовую мощность ФРТ.

8. По результатам расчетных экспериментов проведен сравнительный анализ объектов исследования по выбранным критериям и определен наиболее технически привлекательный вариант. Полученные результаты могут быть применены для оценки схемных вариантов ФРТ, разрабатываемых в перспективе.

9. Разработаны и исследованы оригинальные схемные варианты FACTS контроллеров управляемые ФРТ. На основе схемы треугольника был предложен и исследован частотный преобразователь, в одно и двухканальном исполнении в различных модификациях. Проиллюстрирована возможность качественного преобразования частоты и передачи активной мощности между энергосистемами с различными стандартами по поддержанию частоты. Предложены мероприятия по улучшению качества передачи мощности в процессе частотного преобразования (уменьшение дискретности регулирования, использование дополнительных индуктивных элементов, корректировка стратегии управления (безреверсный вариант)) и доказана их эффективность. На основе ФРТ, выполненного по схеме многоугольника разработано новое управляемое компенсирующее устройство. Показана его эффективность при обеспечении широкого диапазона регулирования реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера.

10. Для построения лабораторного образца ФРТ были разработаны: улучшенная схема ФРТ выполненная в гексагональной конфигурации; трансформаторные модули; усовершенствованный электронный блок коммутации, позволивший оптимизировать количество электронных ключей по сравнению с прототипом и улучшить процесс коммутации; принципиальная схема электронного силового ключа, основанная на транзисторах типа IRGB, которая позволила с помощью модулей синхронизации осуществлять необходимые коммутационные операции в требуемый момент времени.

11. На основе модульного принципа была изготовлена лабораторная модель ФРТ, которая прошла комплексное тестирование, результаты которого позволили сделать вывод об эффективности принятых технических решений, позволивших существенно уменьшить массогабаритные показатели ФРТ и оптимизировать процесс регулирования. Результаты экспериментов на лабораторной модели показали, соответствие с данными, полученными при других методах моделирования.

Результаты исследования, смогут пополнить базу отраслевых теоретических знаний, что позитивно повлияет на темпы продвижения практических инноваций в области повышения управляемости электроэнергетических систем. Результаты работы могут сыграть роль стимула для теоретических исследований в сфере разработки, создания и применения новых типов FACTS - контроллеров, управляемых средствами силовой электроники, в качестве основы интеллектуальных активно-адаптивных сетей.

Материалы исследования также могут послужить основой для разработки и проектирования средств управления режимами межсистемных связей для решения задач диверсификации поставок электроэнергии и либерализации энергорынка в Республике Молдова.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1]. Calinin Lev, Zaitsev Dmitrii, Tîrşu Mihai, Golub Irina. Regulator de fază trifazat cu transformator. Hotărâre nr.4397 din 2014.03.28 de acordare a brevetului de invenție
- [2]. Calinin L.; Zaitsev D., Tirshu M., Golub I., Moraru L. Transformator trifazat de reglare a decalajului de fază cu reglare în punctul neutru. Problemele energeticii regionale 1(27) 2015 pp.11-18.
- [3]. Postolati V., Berzan V., Bikova E., Boşneaga V., Suslov V., Ermurach I. IU. Grigoras G., Gavrilas M., Istrate M. Posibilitățile de utilizare a dispozitivelor de reglare a fazei pentru conectarea la operare paralelă a sistemelor electroenergetice din Moldova ŞI România prin liniile de 110 kv . 14 Regional Energy Forum , Costinesti, Romania 10-14 June 2018 ISSN-L 2284-9491
- [4]. Абакумов Алексей FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) — гибкие системы передачи переменного ток <https://poisk.livejournal.com/589787.html>
- [5]. Алексеев Б.А. Контроль состояния устройств регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой // Электро. – 2008. – № 4
- [6]. Асташев М.Г., Панфилов Д.И. Фазоповоротные устройства с тиристорными коммутаторами для активно-адаптивных электрических сетей // Электричество. – 2013. – № 8. – С. 60–64.
- [7]. Булатов Р.В., Бурмейстер М.В., Кочергин А.В. [и др.] Анализ мирового опыта применения фазосдвигающих трансформаторов для управления режимами электрических сетей // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. LXXX междунар. студ. науч.-практ. конф. № 8(79). URL: [https://sibac.info/archive/technic/8\(79\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/8(79).pdf) (дата обращения: 29.02.2020)
- [8]. Голуб И. "Однотрансформаторное фазорегулирующее устройство для управления потоками мощности в электрических сетях". Problemele Energeticii Regionale 2 (31) 2016 Electroenergetică
- [9]. Голуб И., Зайцев Д., Зубарева И. Модифицированное двухтрансформаторное фазорегулирующее устройство, выполненное на основе классической однотрансформаторной схемы «Delta Connection». Problemele energeticii regionale 1(30) 2016 pp.25-30.
- [10]. Голуб И., Зайцев Д., Тыршу М. Режимы источника реактивной мощности, управляемого фазорегулирующим трансформатором. Problemele Energeticii Regionale 2 (37) 2018 Electroenergetica, pp.62-69.

- [11]. Добрусин Леонид, Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике Силовая Электроника, № 4'2012 http://power-e.ru/pdf/2012_04_60.pdf
- [12]. Дьяконов В. П., Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК_Пресс, 2008
- [13]. Евдокунин Е., Николаев Р., Исаков А. и др. Фазоповоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане / // Новости электротехники. 2007. № 6 (48). С. 38 – 41
- [14]. Зайцев Д., Калинин Л., Тыршу М., Голуб И. Моделирование рабочих характеристик фазорегулирующего трансформатора. «Оперативное управление в энергетике» № 6/2015 с. 21-29
- [15]. Калинин Л., Зайцев Д., Голуб И., Тыршу М. Применение дросселей для повышения качества работы статического преобразователя частоты. Problemele Energeticii Regionale 1 (39) 2019 Electroenergetica pp.34-42.
- [16]. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. "Моделирование характеристик двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства". Problemele energeticii regionale 1(24) 2014 стр.51-62. http://journal.ie.asm.md/assets/files/08_01_24_2014.pdf
- [17]. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. "Моделирование циклоконвертора на базе фазорегулятора с круговым преобразованием". "Интеллектуальные энергетические системы –ESS'15" 9-12 июня , 2015 г. Киев, Украина
- [18]. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. Основные режимные характеристики двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства. Science and technology as a basis of modernization for future sustainable development SSF-2014 18-21 September 2014 - Minsk, Belarus.
- [19]. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. Перспективы совершенствования стратегии управления процессом прямого преобразования частоты переменного тока на базе фазорегулирующего трансформатора. International Conference "Energy of Moldova – 2016. Regional Aspects of Development" 29 September – 01 October, 2016 - Chisinau, Republic of Moldova.
- [20]. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. Характеристики фазоповоротного трансформатора, выполненного по схеме «многоугольник» Problemele Energeticii Regionale 3 (35) 2017 Electroenergetica pp.1-8.
- [21]. Кочин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. -Москва, 2011

- [22]. Кралин А.А., Крюков Е.В., Асабан А.А. Принципы работы тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения для распределительных сетей. Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева УДК 621.3
- [23]. Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М., Шакарян Ю.Г. Тимашова Л.В., Карева С.Н., Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи. Журнал ИЭ №3 17 стр,
- [24]. Постолатий В.М.; Быкова Е.В.; Тимашова Л.В.; Шакарян Ю.Г. Применение управляемых электропередач повышенной пропускной способности с устройствами фазового регулирования потоков мощности для создания интеллектуальных электроэнергетических систем. Сборник докладов 6 международного Электроэнергетического Семинара Электроэнергетического Совета стран СНГ..Москва.2011,156-176. ISBN 978-5-98908-043-4.
- [25]. Стельмаков В.Н., Жмуров В.П., Гринштейн Б.И. Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением. «Энергетик»,2010 №8
- [26]. Черных И.В., Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink.: Москва-Санкт-Петербург,2008
- [27]. Шигапов И.А. Общая характеристика и классификация устройств FACTS АЛЛЕЯ НАУКИ 5 (21) Год: 2018 Страницы: 481-485
- [28]. ABB; <http://new.abb.com/products/transformers/power/system-intertie-transformers>
- [29]. Abhinav Kumar Singh, Bikash C. Pal, Flexible AC Transmission Systems in Dynamic Estimation and Control of Power Systems, 2019
- [30]. Amelin A.A. Upravlenie peretokom aktivnoj moshchnosti po neodnorodnoj mezh sistemnoj svyazi v ehnergosisteme. [Control the Active Power Flow on non-uniform intersystem communication in the power system]. Innovacii i investicii (Moskva) 2014, No:5 pp: 167-169 ISSN: 2307-180X. (In Russian).
- [31]. Amin S. M., Wollenberg B. F. Toward a Smart Grid. — IEEE P&E Magazine, September/October, 2005
- [32]. Anwar S. Siddiqui ; Shagufta Khan ; Shahzad Ahsan ; M.I. Khan ; Annamalai Application of phase shifting transformer in Indian Network Green Technologies (ICGT), 2012 International Conference DOI: 10.1109/ICGT.2012.6477970
- [33]. Arnold C.P., Duke R.M., Arrillaga J. Transient stability improvement using thyristor controlled quadrature voltage injection // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, March 1981, № 3, Vol. PAS–100, pp. 1382–1388.

- [34]. Baker R.; Guth G.; Egli W.; Eglin P. Control Algorithm for a Static Phase Shifting Transformer to Enhance Transient and Dynamic Stability of Large Power Systems IEEE Power Engineering Review (Volume: PER-2 , Issue: 9 , Sept. 1982) **Page(s):** 70 – 71 DOI: 10.1109/MPER.1982.5519515
- [35]. Balyberdin L. L. i dr. Uvelichenie moshchnosti ehlektroperedachi 330/400 kV s vstavkoj postoyannogo toka mezhdru ehnergosistemami Rossii i Finlyandii.[Increasing the power of 330 / 400kV transmission with a back-to-back HVDC converter station between the power systems of Russia and Finland] EHlektricheskie stancii, 2004, № 10.pp. 50-54. (In Russian).
- [36]. Beauregard F.; Brochu J.; Morin G.; Pelletier P. Interphase power controller with voltage injection IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 9 , Issue: 4 , Oct 1994 Page(s): 1956 – 1962 DOI: 10.1109/61.329527
- [37]. Belivanis Manolis.; K. R. W. Bell Coordination of phase-shifting transformers to improve transmission network utilization 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe) 11-13 Oct. 2010 DOI: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638916
- [38]. Belivanis Manolis; Keith R. W. Bell Use of phase-shifting transformers on the Transmission Network in Great Britain 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010 31 Aug.-3 Sept. 2010
- [39]. Beňa L., Buczek K., Rydz P., Wachta H. Active Power Flow Control on Cross-Border Connections Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems pp 185-206 21 October 2017
- [40]. Bladow J.K.; Montoya A.H. Experiences with parallel EHV phase shifting transformers IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 6 , Issue: 3 , Jul 1991) **Page(s):** 1096 – 1100 DOI: 10.1109/61.85853
- [41]. Bosneaga, V.A.; Suslov, V.M.; Postolaty, V.M. Mathematical Model of Flexible Alternating Current Link Based on Phase-Shifting Transformer with Circular Phase Angle Rotation. 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems Conference SIELMEN 2015. pp.171-176, ISBN 978-606-567-284-0
- [42]. Bresesti P., Sforza M., Allegranza V., Canevari D., and Vailati R.; Application of Phase Shifting Transformers for a secure and efficient operation of the interconnection corridors.

- [43]. Brochu J., Pelletier P., Beauregard F., Morin G. The interphase power controller: a new concept for managing power flow within AC networks *IEEE Transactions on Power Delivery* (Volume: 9 , Issue: 2 , Apr 1994) DOI: 10.1109/61.296264
- [44]. Brochu J., Beauregard F., Cloutier R., Bergeron A., Garant L. (Hydro-Quebec, Canada), F.Sirois (Ecole Polytechnique de Montreal), M.I.Henderson (ISO New England, USA). Innovative applications of phase-shifting transformers supplemented with series reactive elements. CIGRE, 2006, A2-203 (плавка гололеда , реактив, IPC
- [45]. Brochu J., Beauregard F., Morin G., Lemay J., Pelletier P., Kheir S. “The IPC technology – a new approach for substation updating with passive short-circuit limitation”, *IEEE Transactions PWRD*, Vol.13, No.1.
- [46]. Brochu J., Beauregard F., Morin G., Lemy J., Pelletier P. and Thallam RS “Application of the interphase power controller technology for transmission line power flow control”, *IEEE Transactions PWRD*, Vol.12, No.2.
- [47]. Brochu Jaques, François Beauregard, Gaston Morin, Pierre Pelletier. Interphase Power Controller adapted to the operating conditions of networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.10, No.2;
- [48]. Bryancev A.M., Bryancev M.A., Dyagileva S.V., Karymov R.R., Lur'e A.I., Maklecova E.E., Negryshev A.A. Reguliruyemye istochniki reaktivnoj moshchnosti s upravlyaemyimi podmagnichivaniem shuntiruyushchimi reaktorami i batareyami kondensatorov. *EHLEKTROTEKHNIKA* 4 God: 2010
- [49]. Calinin L., Zaitsev D., Tirsu M., Golub I. Investigation of the possibilities of increasing the frequency converter efficiency based on the phase-shift transformer. 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), 21-23 May 2019, Cluj-Napoca, Romania. (SCOPUS)
- [50]. Cardenas Hans; Zhang Lei; Noel Julien. Improvement on energy trade capacity for asynchronous power system by application of hybrid multi-infeed direct current transmission system *IEEE URUCON*, Montevideo, 2017, pp. 1-4, DOI: 10.1109/URUCON.2017.8171853.
- [51]. Cardenas Hans; Zhang Lei; Noel Julien Modeling, Simulation and Application of Modular Multilevel Converter in Hybrid High Voltage Direct Current Transmission System. *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA)*, Lima, 2018, pp.1-5. doi: 10.1109/TDC-LA.2018.8511758.

- [52]. Carvalho Pedro M. S.; Correia Pedro F.; Luís A. F. M. Ferreira. Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks. IEEE Transactions on Power Systems (Volume: 23, Issue: 2, May 2008). Page(s): 766 – 772
- [53]. Chai Yi ; Feng Xiaohui ; Zhang Ke ; Sun Jian Transient stability model and preventive control based on phase shifting transformer in power system 2015 34th Chinese Control Conference (CCC) 28-30 July 2015 14 **DOI:** 10.1109/ChiCC.2015.7261050 September 2015
- [54]. Chung-Neng Huang Feature analysis of power flows based on the allocations of phase-shifting transformers. IEEE Transactions on Power Systems , Feb. 2003 Page(s): 266–272
- [55]. Chung-Neng Huang Preventive flow control for transient stability by phase shifting transformers 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No.03CH37495) 7-12 Sept. 2003 DOI: 10.1109/TDC.2003.1335358
- [56]. Deepika Sinha, Srijana Bharadwaj Asst. Prof. Vikas Kumar A Review Paper on Icing and Methods to De - Ice the Transmission Line International Journal of Engineering Research and Reviews ISSN 2348 - 697X (Online) Vol. 3, Issue 2, pp: (5 -9), Month: April-June 2015, Available at: www.researchpublish.com
- [57]. Demidova M.V., Semina I.A., Babich N.A. Asinhronizirovannyj sinhronnyj ehlektromekhanicheskij preobrazovatel' chastoty. [Asynchronous synchronous electromechanical frequency converter]. Aktual'nye voprosy ehnergetiki materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2017 Izdatel'stvo: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet pp: 346-348 (In Russian).
- [58]. Demirok Erhan; González Pablo Casado; Kenn H.B. Frederiksen; Dezso Sera; Rodriguez Pedro; Teodorescu Remus. Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids. IEEE Journal of Photovoltaics (Volume: 1, Issue: 2, Oct. 2011) Page(s): 174 – 182.
- [59]. Denboer1 N.; Karawita1 C.; Mohaddes M. Frequency scan based screening technique for harmonic interactions of HVDC systems. 13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017) doi:10.1049/cp.2017.0035.
- [60]. Dobrijević Djordje M.; Milanović Jovica V. Contribution of Phase Shifting Transformers to Improvement of the Security of Power Transfer from the Power Plant. 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010) 7-10 Nov. 2010 DOI: 10.1049/cp.2010.0953

- [61]. DOĞAN Erdi, YÖRÜKEREN Nuran. Investigation of control of power flow by using phase shifting transformers: Turkey case study Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences pp2259-2275 Published Online: 19.02.2019
- [62]. Ekstrom I. R. Added angles for melting Ice from power lines Electrical Engineering (Volume: 78 , Issue: 4 , April 1959) 319 – 319 DOI: 10.1109/EE.1959.6446333
- [63]. Ekstrom I. R.. More Angles of Phase Shifting added to Previously Known Ice-Melting Methods Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems (Volume: 77 , Issue: 3 , April 1958) DOI: 10.1109/AIEEPAS.1958.4500178
- [64]. El-Saady G. A variable structure static phase shifting transformer for power system stabilization. Electric Power Systems Research 3 May 1999, Pages 71-78
- [65]. Fang Z. Peng, Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and Resilient AC Distribution Systems (RACDS) in Smart Grid. Proceedings of the IEEE Year: 2017, Volume: 105, Issue: 11 Pages: 2099-2115.
- [66]. Fei Wang; Jorge L. Duarte; Marcel A. M. Hendrix. Pliant Active and Reactive Power Control for Grid-Interactive Converters Under Unbalanced Voltage Dips. IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 26, Issue: 5, May 2011) Pp: 1511 – 1521.
- [67]. Flourentzou Nikolas; Agelidis Vassilios G. Georgios; Demetriades D. VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview. IEEE Transactions on Power Electronics. (Volume: 24, Issue: 3, March 2009) pp: 592–602 doi: 10.1109/TPEL.2008.2008441.
- [68]. Foata M., Rajotte Cl., Jolicoeur A. On-load tap changer reliability and maintenance strategy. Доклад СИГРЭ А2–102, 2006.
- [69]. Gabrijel U., Mihalic R. Transient stability assessment of power systems with phase shifting transformers EUROCON 2003. Computer as a Tool. The IEEE Region 8, Volume: 2 DOI: 10.1109/EURCON.2003.1248190
- [70]. Gellings C. W. The Smart Grid. Enabling Energy Efficiency and Demand Response. — CRC Press, 2010
- [71]. Gorozhankin P.A., Majorov A.V., Makarovskij S.N., Rubcov A.A. Upravlenie napryazheniem i reaktivnoj moshchnost'yu v ehlektroehnergeticheskikh sistemah. Evropejskij opyt.// EHlektricheskie stancii, 2008. №6, pp.40-47.
- [72]. Grigsby Leonard L. (Editor) The Electric Power Engineering Handbook (Electrical Engineering Handbook) May 16, 2012

- [73]. Grünbaum R., Petersson Å., and Thorvaldsson B., “FACTS, improving the performance of electrical grids,” ABB Rev., pp. 11–18, Mar. 2003.
- [74]. Hadzimuratovic Semir; Lothar Fickert Determination of critical factors for optimal positioning of Phase-Shift Transformers in interconnected systems 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) 16-18 May 2018 DOI: 10.1109/EPE.2018.8396033
- [75]. Han Z. X. Phase Shifter and Power Flow Control IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (Volume: PAS-101, Issue: 10 , Oct. 1982) DOI: 10.1109/TPAS.1982.317064
- [76]. Hossein Nasir Aghdam Analysis of Phase-Shifting Transformer (PST), on Congestion management and Voltage Profile in Power System by MATLAB/Simulink Toolbox Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology3(7) · July 2011
- [77]. http://pedsovet.info/info/pages/referats/info_00002.htm
- [78]. <http://rol-elektroenergetiki.html>
- [79]. http://www.perspektivy.info/book/tendencii_razvitiya_mirovoj_elektroenergetiki_ch_2_2_013-11-22.htm
- [80]. https://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_booster
- [81]. <https://helpiks.org/5-28390.html>
- [82]. https://life-prog.ru/1_15252_fizicheskoe-modelirovanie-fm.html
- [83]. <https://marketresearchmentor.com/reports/global-phase-shifting-transformers-market/>
- [84]. <https://mig-om.ru/novosti/rol-elektroenergetiki-v-sovremennom-mire.html>
- [85]. https://neftegaz.ru/analisis/world_market/329334-9-tendentsiy-razvitiya-mirovoy-energetiki-do-2020-goda/
- [86]. <https://otransformatore.ru/vopros-otvet/fazopovorotnyj-transformator/>
- [87]. <https://transformator.ru/fazopovorotny-transformator>
- [88]. https://portal.tpu.ru/SHARED/i/INNA/umkd/Tab/lek_3.pdf
- [89]. <https://repetit.ru/blog/articles/analiz-sintez-analogiya-i-drugie-myslitelnye-operacii>
- [90]. <https://studfile.net/preview/2689004/>
- [91]. <https://studfile.net/preview/8187319/page:4/>
- [92]. https://www.ruscable.ru/article/Razvitie_ustrojstv_FACTS
- [93]. <https://www.sites.google.com/site/celovekkotoryjizobreelxxvek/kakova-priroda-elektromagnitizma-v-zivyh-organizmah/terenteva-s/aktualnost-primenenia-elektricitstva-v-zizni-celoveka>

- [94]. <https://zen.yandex.ru/media/energovector/fazopovorotnye-transformatory-5d766fd8ba281e00ae2a3ce7>
- [95]. Hurlet P. (VA TECH JST, France), J-C.Riboud (AREVA, France), J.Margoloff (RTE, France), A.Tanguy (EDF R&D, France). French experience in phase-shifting transformers. CIGRE, Paris, 2006, A2-204;
- [96]. IEEE Vision for Smart Grid Year: 2013 Pages: 1-10.
- [97]. IEEE Smart Grid Controls: 2030 and Beyond Reference Model Year: 2014 Pp: 3-8.
- [98]. Ilahi Bakhsh Farhad; Mohammad Irshad; Jamil Asghar M. S. Modeling and simulation of variable frequency transformer for power transfer in-between power system networks. India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010) pp: 1-7.
- [99]. Ilyin V.V. Introduction of Smart Grid https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5363
- [100]. Janda Žarko S. Pregled standarda i preporuka za kontrolu viših harmonika u električnim mrežama Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"2004, br. 16, str. 33-46.
- [101]. Janssen M. C. The Smart Grid Drivers. — PAC, June 2010, p. 77
- [102]. Jarman P., Hynes P., Bickley T., Darwin A., Thomas N., «The specification and application of large quadrature boosters to restrict post-fault power flows», CIGRE Session 2006, vol. A2-207, 2006.
- [103]. Johansson N Control of Dynamically Assisted Phase-shifting Transformers Stockholm 2008 <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:13258/fulltext01.pdf>
- [104]. Kala Meah; Sadrul Ula. Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting pp:1–5 doi:10.1109/PES.2007.385993.
- [105]. Kalinin L., Soldatov V. Application of the phase shifting transformers for power line ice-melting. IWAIS'90 Tokyo 1990
- [106]. Kalinin L., Zaitcev D., Tirshu M., Golub I Simulation of the mode of frequency adjustable electric connection. WEC Central and Eastern Europe Regional Energy Forum FOREN 201612-16 June 2016, Vox Maris Grand Resort, Costinesti, Romania
- [107]. Kalinin L., Zaitsev D., Tirsu M., Golub I.The Opportunities for Efficiency Increase of Phase-Shifting Transformers in Power Transmission Operational Modes. 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 29 September to 2 October 2019, Bucharest, Romania. (SCOPUS)
- [108]. Kalinin L.; Zaitsev D., Tirshu M., Golub I. The main technical characteristics of the phase difference adjusting device with two transformers FOREN 2014 - The 12th Wec

- Central & Eastern Europe Regional Energy Forum. key issue 4. integrating renewable energy sources into the electricity transmission grid. București, 21-26 iunie 2014.
- [109]. Khan Fida Muhammad; Abbasi Ayesha; Khan Muhammad Azam; Imran Muhammad. General overview of using High Voltage Direct Current (HVDC) transmission in Pakistan for maximum efficiency and. 2015 Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET) pp.1–5 doi:10.1109/PGSRET.2015.7312221.
- [110]. Khan Rizwan M.; Iqbal Atif; Farhad Ilahi. Digital simulation of variable frequency transformer. Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India. pp.1–6 doi:10.1109/PEDES.2010.5712376.
- [111]. Khan Umar Modeling and Protection of Phase Shifting Transformers (2013). Electronic Thesis and Dissertation Repository. 1701.
- [112]. Khelfi A, Mesbah T., Djellad A. TCPST (thyristor control phase shifting transformer) impact on power quality Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) Sousse, Tunisie – 2013
- [113]. Klapp Jaime, Jorge L Cervantes-Cota, Luis C Longoria-Gandara, Ruslan Gabbasov Energy for the Present and Future: A World Energy Overview Environmental Science and Engineering book series (ESE)
- [114]. Kling W., Klaar D., Schuld J., Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity, CIGRE 2004, C2-207, 21, rue d'Artois, F-75008 Paris.
- [115]. Koreman C.G.A.; Leushuis P.J.M.; Janssen M.C. Protection and control of two phase shifting transformers in the Netherlands 2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection DOI: 10.1049/cp:20040087
- [116]. Kreikebaum Frank; Debrup Das; Yi Yang; Frank Lambert; Deepak Divan Smart Wires — A distributed, low-cost solution for controlling power flows and monitoring transmission lines 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe) Pages: 1-8. Feltes J.W.; Gemmell B.D.; Retzmann D., From Smart Grid to Super Grid: Solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting Year: 2011 Pages: 1-6.
- [117]. Lemay,J.; Berube,P.; Brault,M.M.; Gvozdanovic,M.; Henderson, M.I.; Graham,M.R.; Smith,G.E.; Hinnners,R.F.; Kirby,L.R.;Beauregard,F.;Brochu,J. The Plattsburgh Interphase Power Controller, Transmission and Distribution Conference , 2000 IEEE, Pages 648-653,vol.2

- [118]. library.e.abb.com/public/2eee6e01c1e2a30583257984002ce047/PST_low%20res.pdf
- [119]. Long W.F.; Litzenberger W. Fundamental concepts in High-Voltage Direct-Current power transmission. PES T&D 2012, Orlando, FL, 2012, pp. 1-2. doi: 10.1109/TDC.2012.6281596.
- [120]. Majid Farmad, Shahrokh Farhangi, S. Afsharnia, Gevork B. Gharehpetian Application of voltage source converter in Interphase Power Controller for power flow control and fault limitation April 28,2010 DOI: 10.1109/IECON.2008.4758316
- [121]. Marinakis; Glavic M.; Van Cutsem T. Control of phase shifting transformers by multiple transmission A.system operators. **Conference** IEEE Lausanne Power Tech 1-5 July 2007 DOI: 10.1109/PCT.2007.4538303
- [122]. Masuda M.; Bormio E.; .Jardini J.A; Silva F.A.T, Copeliovitch S.; Camargo J. Development and implementation of FACTS (flexible AC transmission systems) devices in distribution networks 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (IEEE Cat. No. 04EX956)
- [123]. Merkhouf A.; Upadhyay S; Doyon P. Variable frequency transformer-an overview. Conference: Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE doi: 10.1109/PES.2006.1709639.
- [124]. Mihalic R.; Zunko P. Phase-shifting transformer with fixed phase between terminal voltage and voltage boost: tool for transient stability margin enhancement IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution (Volume: 142 , Issue: 3 , May 1995) 257 – 262 DOI: 10.1049/ip-gtd:19951741
- [125]. Mohammad Najjar , Shahrokh Farhangi, Hossein Imaneini A Method to Control the Interphase Power Controller with Common DC Bus Electric Power Components and Systems · February 2018 with 256 Reads DOI: 10.1080/15325008.2017.1362070
- [126]. Muhajir Tadesse Mekonnen ; Ronnie Belmans The influence of phase shifting transformers on the results of flow-based market coupling 9th International Conference on the European Energy Market 10-12 May 2012 DOI: 10.1109/EEM.2012.6254746
- [127]. Nadeau Denis. A 100-MW Variable Frequency Transformer (VFT) on the Hydro-Québec TransÉnergie Network - The Behavior during Disturbance. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, 2007, pp. 1-5. doi: 10.1109/PES.2007.385584.
- [128]. Osipov D.A. Sposoby podavleniya garmonik v sistemah ehlektrosnabzheniya. [Ways to suppress harmonics in power supply system's] Mezhdunarodnaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh Prospekt svobodnyj-2016, Krasnoyarsk, Si'irskij federal'nyj Universitet, 15-25 aprelya 2016. pp.49-52. (In Russian).

- [129]. Pauli V.K., Vorotnikov R.A. Kompensaciya reaktivnoj moshchnosti kak ehffektivnoe sredstvo racionalnogo ispol'zovaniya ehlektroehnergii // EHnergoehkspert. – 2007. – № 2
- [130]. PC57.135_D9b, Apr 2011 - IEEE Draft Guide for the Application, Specification and Testing of Phase Shifting Transformers 20 April 2011 DOI: 10.1109/IEEESTD.2011.5755152
- [131]. Phase shifting transformers Reliable and efficient power flow control; Power and productivity for a deter world; ABB;
- [132]. Pratiksha Vitthalrao Padmane and Pritee R. Rane Power quality improvement by using Interphase power controller International Journal of Current Research Vol. 7, Issue, 12, pp.24123-24127, December, 2015
- [133]. Prokopenko S.A. Asinhronizirovannyj ehlektromekhanicheskij preobrazovatel' chastoty. [Asynchronized electromechanical frequency converter] Aktual'nye voprosy ehnergetiki. Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii studentov, magistrantov, aspirantov. 2016 Izdatel'stvo: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet pp: 168-172. (In Russian).
- [134]. R.Korab and R. Owczarek Impact of phase shifting transformers on cross-border power flows in the Central and Eastern Europe region Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences, Vol. 64, No. 1, 2016 DOI:10.1515/bpasts-2016-0014
- [135]. Rafael Mihalič, Uros Gabrijel Transient stability assessment of systems comprising phase-shifting FACTS devices by direct methods International Journal of Electrical Power & Energy Systems July 2004, Pages 445-453
- [136]. Rahul R.; Jain Amit Kumar; Bhide Ravindra. Analysis of variable frequency transformer used in power transfer between asynchronous grids. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) 2012 pp: 1 – 5.
- [137]. Rajiv K. Varma. Introduction to FACTS Controllers. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. 15-18 March 2009
- [138]. Rasolomampionona Desire, Sohail Anwar Interaction between phase shifting transformers installed in the tie-lines of interconnected power systems and automatic frequency controllers International Journal of Electrical Power & Energy Systems October 2011, Pages 1351-1360
- [139]. Ren Cloutier ; Andr Bergeron ; Jacques Brochu On-Load Network De-Icer Specification for a Large Transmission Network IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 22 , Issue: 3 , July 2007) 1947 – 1955 DOI: 10.1109/TPWRD.2007.899772
- [140]. Rodríguez Pedro; Timbus Adrian; Teodorescu Remus; Liserre Marco; Blaabjerg Frede. Reactive Power Control for Improving Wind Turbine System Behavior Under Grid

- Faults. IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 24, Issue: 7, July 2009) Page(s): 1798 – 1801.
- [141]. Sarwar M.; Asad B., A review on future power systems; technologies and research for smart grids 2016 International Conference on Emerging Technologies (ICET) Year: 2016 Pages: 1-6
 - [142]. Seleznev A.S. Snizhenie urovnya vysshih garmonik v ehlektricheskikh setyah vysokogo napryazheniya. [Reducing the level of higher harmonics in electric networks of high voltage]. Vestnik IrGTU 2014, №4 (87), pp.143-146. (In Russian).
 - [143]. SGB-Smit; <https://www.sgb-smit.com/products/large-power-transformers/phase-shifting-transformers>.
 - [144]. Shaarbafi Karim; Transformer Modelling Guide; Year: 2017; Page: 192 - 196.
 - [145]. Sharaf Adel M.; Khaki Behnam, A FACTS based switched capacitor compensation scheme for smart grid applications 2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications Year: 2012 Pages: 1-5.
 - [146]. Siemens; <https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/high-voltage/>;
 - [147]. Sisi Li, Yuhong Wang, +3 authors Pengfei He Review of De-icing Methods for Transmission Lines 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application 13-14 Oct . 2010 DOI:10.1109/ISDEA.2010.185
 - [148]. Sweeney R. ; Stewart G.; O'Donoghue P.; Smith P. The specification, design and protection of phase shifting transformers for the enhanced interconnection between Northern Ireland and the Republic of Ireland Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission 28-30 Nov. 2001 DOI: 10.1049/cp:20010555
 - [149]. Sweeney R., Stewart G. (NIE Powerteam, Northern Ireland), P.O'Donoghue (ESB International, Ireland), P.Gaffney (PCAS Ireland). The specification and control of the phase shifting transformers for the enhanced interconnection between northern Ireland and the Republic of Ireland. CIGRE, Paris, 2002, 14-118;
 - [150]. Tamini; <http://www.tamini.it/power-applications/transformers-reactors-for-electrical-energy-transmission/phase-shifting-transformers-PST>;
 - [151]. Tapia A., Tapia G., Ostolaza J.X. Reactive power control of wind farms for voltage control applications. Renewable Energy Vol. 29, Iss. 3, March 2004, Pages 377-392
 - [152]. Tirshu M., Kalinin L., Zaitsev D., Golub I., Spivak V. The model and characteristics of circular phase convertor. SIELMEN 2015 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems pp.180-184.

- [153]. Tirsu M., Calinin L., Zaitev D., Golub I., Kaloshin D Means and methods for active and reactive power exchange/regulation. LAP LAMBERT Academic Publishing, ISBN: 978-620-2-06664-8, 2017, 126pp
- [154]. Toshiba; <http://www.toshiba-tds.com/tandd/products/trans/en/pstrans.htm>;
- [155]. Verboomen J.; Papaefthymiou G.; Kling W. L.; L. van der Sluis Use of Phase Shifting Transformers for Minimising Congestion Risk Proceedings of the 10th International Conference on Probablistic Methods Applied to Power Systems 25-29 May 2008
- [156]. Verboomen J.; D. Van Hertem ; P.H. Schavemaker ; W.L. Kling; R. Belmans Phase shifting transformers: principles and applications Conference: Amsterdam, Netherlands 18-18 Nov. 2005 DOI: 10.1109/FPS.2005.204302
- [157]. Verboomen J.; van Hertem D.; Schavemaker P.H.; Kling W.L.; Belmans R. Coordination of Phase Shifters by Means of Multi-Objective Optimisation Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference 6-8 Sept. 2006 DOI: 10.1109/UPEC.2006.367514
- [158]. Verboomen J.; Van Hertem D.; .Schavemaker P. H ; Kling W. L.; Belmans R. Border-Flow Control by means of Phase Shifting Transformers 2007 IEEE Lausanne Power Tech 1-5 July 2007 DOI: 10.1109/PCT.2007.4538510
- [159]. Verboomen Jody Method for calculating total transfer capacity by optimising phase shifting transformer settings Conference: CIGRE 2008, At Paris
- [160]. Vorotnickij V.E., Rabinovich M.A., Kakovskij S.K. Optimizaciya rezhimov ehlektricheskikh setej 220-750 kV po reaktivnoj moshchnosti i urovnyam napryazheniya.// EHnergiya edinoj seti, 2013, №3(8), pp. 50-59
- [161]. Wei Qiao; Ronald G. Harley; Ganesh Kumar Venayagamoorthy. Coordinated Reactive Power Control of a Large Wind Farm and a STATCOM Using Heuristic Dynamic Programming. IEEE Transactions on Energy Conversion (Volume: 24, Issue: 2, June 2009), Pp. 493 – 503.
- [162]. Yousif Hakam Muayad; Vural Ahmet Mete Modeling of modular multilevel converter based high voltage direct current transmission system. 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE) 2017 pp. 43–51 doi: 10.1109/ICEEE2.2017.7935790.
- [163]. Yuki Kawaura, Sho Yamanouchi, Miki Ichihara, Shinich Iwamoto, Yo Suetsugu, Tomoyuki Higashitani, «Phase-shifting transformer application to power-flow adjustment for large-scale PV penetration», Region 10 Conference (TENCON) 2016 IEEE, pp. 3328 - 3331, 2016.

- [164]. Zahedi L., Mehdi S. Naderi , Mohammad S. Naderi , G. B. Gharehpetian E. Babaei. Interphase Power Controller Application to Mitigate Transmission Network Short Circuit Level RE&PQJ, Vol.1, No.9, May 2011 DOI.org/1024084/repqj09.306
- [165]. Zelenohat N.I., Aristov I.S. Analiz staticheskoy ustojchivosti ehnergosistem pri nalichii gibkih mezh sistemnyh svyazej s preobrazovatelyami chastoty. [Analysis of static stability of power systems in the presence of flexible interconnections with frequency converters] EHnergetik Izdatel'stvo: Nauchno-tekhnicheskaya firma "EHnergoprogress" (Moskva) 2011, No:4 pp: 27-30. (In Russian).
- [166]. Zhang B.M. and Q.F. Ding The development of FACTS and its control APSCOM-97. International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 1997 p. 48 – 53
- [167]. Zhenhua Zhang, Multi-function Integrated FACTS Devices and its Application in the Development of Smart Grid 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering Year: 2010 Pages: 5349-5352.
- [168]. Zmaznov Eugeny; Lozinova Natalya; Suslova Olga; Andreev Mikhail; Ufa Ruslan. HVDC LCC technology and power quality issues in cross-border electrical power transmission Russia — Finland. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). 2018 doi 10.1109/ISGTEurope.2018.8571805.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме "звезда"

Результаты опыта холостого хода ФРТ, выполненного по схеме «звезда», приведены в Таблице П1.1.

Таблица П1.1. Результаты опыта холостого хода ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

позиция	ψ°	k_y (о.е.)	U_{sr} (В)	I_{xx} (А)	ΔP_{xx} (Вт)	ΔQ_{xx} (ВАр)	Z_{xx} (Ом)	r_{xx} (Ом)	x_{xx} (Ом)
-12	-59,4	-1,0	229,6	0,268	27,6	55,11	858,2	1917	960
-11	-54	-0,91	214,8	0,268	27,6	55,11	858,2	1917	960
-10	-50,4	-0,83	199	0,268	27,6	55,11	858,2	1917	960
-9	-45	-0,75	182,4	0,268	27,6	55,11	858,2	1917	960
-8	-41,4	-0,66	164,8	0,268	27,6	55,11	858,2	1917	960
-7	-36	-0,58	146,5	0,268	27,59	55,11	858,2	1917	960
-6	-30,6	-0,5	127,2	0,268	27,6	55,1	858,2	1917	960
-5	-25,2	-0,42	107,2	0,268	27,6	55,1	858,2	1917	960
-4	-21,6	-0,33	86,6	0,268	27,6	55,1	858,2	1917	960
-3	-16,2	-0,25	65,39	0,268	27,6	55,1	858,2	1917	960
-2	-10,8	-0,17	43,78	0,268	27,61	55,1	858,2	1917	960
-1	-5,4	-0,08	21,84	0,268	27,61	55,1	858,2	1917	960
0	1,8	0	0,4	0,268	27,61	55,1	858,2	1917	960
1	7,2	0,08	22,33	0,268	27,61	55,1	858,2	1917	960
2	12,6	0,17	44,26	0,268	27,61	55,1	858,2	1917	960
3	18	0,25	65,88	0,268	27,6	55,1	858,2	1917	960
4	23,4	0,33	87,07	0,268	27,6	55,1	858,2	1917	960
5	28,8	0,42	107,7	0,268	27,6	55,1	858,2	1917	960
6	32,4	0,5	127,7	0,268	27,6	55,1	858,2	1917	960
7	37,8	0,58	146,9	0,268	27,59	55,11	858,2	1917	960
8	43,2	0,66	165,2	0,268	27,6	55,11	858,2	1917	960
9	48,6	0,75	182,8	0,268	27,6	55,11	858,2	1917	960
10	52,2	0,83	199,4	0,268	27,6	55,11	858,2	1917	960
11	57,6	0,91	215,1	0,268	27,6	55,11	858,2	1917	960
12	61,2	1,0	229,9	0,268	27,6	55,11	858,2	1917	960

Результаты исследования ФРТ в режиме короткого замыкания, представлены в Таблица П1.2.

Таблица П1.2. Результаты опыта короткого замыкания ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

позиция	k_y (о.е.)	$U_{кз}$ (В)	$\Delta P_{кз}$ (Вт)	$\Delta Q_{кз}$ (ВАр)	$z_{кз}$ (Ом)	$r_{кз}$ (Ом)	$x_{кз}$ (Ом)
-12	-1,0	35,67	340,6	259,3	2,97	2,37	1,8
-11	-0,91	35,88	347,8	253,6	2,99	2,42	1,76
-10	-0,83	36,13	355,4	248,3	3,0	2,47	1,72
-9	-0,75	36,6	365,4	243,8	3,05	2,54	1,69
-8	-0,66	37,05	374,6	239,1	3,09	2,6	1,66
-7	-0,58	36,48	375,6	225,1	3,04	2,61	1,56
-6	-0,5	36,65	380,8	220,2	3,05	2,64	1,53
-5	-0,42	36,79	385,2	215,7	3,07	2,68	1,5
-4	-0,33	37,18	392,2	212,9	3,1	2,72	1,48
-3	-0,25	37,5	397,6	210,3	3,13	2,76	1,46
-2	-0,17	36,64	392,6	197,5	3,05	2,73	1,37
-1	-0,08	36,6	393,1	195,9	3,05	2,73	1,36
0	0	36,48	391,9	195,0	3,04	2,72	1,35
1	0,08	36,6	393,1	195,9	3,05	2,73	1,36
2	0,17	36,65	392,8	197,6	3,05	2,73	1,37
3	0,25	37,5	397,6	210,4	3,13	2,76	1,46
4	0,33	37,18	392,2	212,9	3,1	2,72	1,48
5	0,42	36,8	385,4	215,9	3,07	2,68	1,5
6	0,5	36,65	380,8	220,2	3,05	2,64	1,53
7	0,58	36,45	375,0	224,7	3,04	2,6	1,56
8	0,66	37,08	375,2	239,5	3,09	2,61	1,66
9	0,75	36,58	365,1	243,5	3,05	2,54	1,69
10	0,83	36,12	355,2	248,2	3,01	2,47	1,73
11	0,91	35,9	348,2	253,9	2,99	2,42	1,76
12	1,0	35,67	340,6	259,4	2,97	2,37	1,8

Результаты нагрузочных испытаний ФРТ, при регулировании угла фазового сдвига с помощью средств силовой электроники приведены в Таблице П1.3.

Таблица П1.3 Результаты нагрузочных испытаний ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью средств силовой электроники

Позиция	ψ°		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$	
	хх	нагр. R	хх	нагр. R	хх	нагр. R	
-12	-59,4	-64,8	229,6	233,6	200,2	368,9	
-11	-54	-59,4	214,8	219,6	199,6	376,5	
-10	-50,4	-55,8	199,00	204,90	199,1	383,6	
-9	-45,0	-50,4	182,40	189,30	198,3	393,7	
-8	-41,4	-46,8	164,80	173,10	197,5	403,2	
-7	-36,0	-41,4	146,50	155,70	197,6	403,8	
-6	-30,6	-36,0	127,20	138,10	197,2	408,9	
-5	-25,2	-30,6	107,20	120,10	196,8	413,4	
-4	-21,6	-25,2	86,60	101,90	196,3	420,0	
-3	-16,2	-19,8	65,39	83,69	195,8	425,9	
-2	-10,8	-14,4	43,78	65,02	196,3	421,0	
-1	-5,4	-9,0	21,84	48,76	196,3	421,1	
0	1,8	-3,6	0,40	36,70	196,4	419,9	
1	7,2	1,8	22,3	34,1	196,3	421,1	
2	12,6	7,2	44,3	42,4	196,3	420,9	
3	18,0	12,6	65,9	56,3	195,8	425,8	
4	23,4	18,0	87,1	72,6	196,3	419,8	
5	28,8	23,4	107,7	89,7	196,9	413,2	
6	32,4	28,8	124,7	107,0	197,2	408,6	
7	37,8	34,2	146,9	123,9	197,6	403,0	
8	43,2	37,8	165,2	139,6	197,5	402,8	
9	48,6	43,2	182,8	155,6	198,3	392,9	
10	52,2	46,8	199,4	170,9	199,1	382,8	
11	57,6	52,2	215,1	185,4	199,7	375,7	
12	61,2	55,8	229,9	199,2	200,3	368,1	
Позиция	Параметры	W'_{1q}		W''_{1q}		W_{2q}	
		хх	нагр. R	хх	нагр. R	хх	нагр. R
-12	U, B	114,9	118	114,7	115,7	229,7	219,6
	I, A	0,27	12,13	0	12	0,12	10,45
-11	U, B	107,4	110,9	107,3	108,9	214,9	205,2
	I, A	0,27	12,13	0	12	0,12	10,66
-10	U, B	99,6	103,40	99,50	101,60	199,20	189,90
	I, A	0,27	12,130	0	12,000	0,120	10,87
-9	U, B	91,2	95,49	91,10	93,97	182,50	173,80
	I, A	0,27	12,130	0	12,000	0,120	11,07
-8	U, B	82,5	87,22	82,40	85,98	165,00	156,80
	I, A	0,27	12,120	0	12,000	0,12	11,25
-7	U, B	73,8	78,36	73,20	77,38	146,60	138,70
	I, A	0,27	12,130	0	12,000	0,130	11,43
-6	U, B	63,6	69,45	63,60	68,73	127,40	120,40
	I, A	0,27	12,120	0	12,000	0,130	11,59

-5	U, B	53,7	60,30	53,60	59,85	107,40	101,40
	I, A	0,27	12,130	0	12,000	0,130	11,73
-4	U, B	43,3	51,05	43,30	50,85	86,80	81,90
	I, A	0,27	12,120	0	12,000	0,130	11,84
-3	U, B	32,7	41,85	32,70	41,87	65,60	61,99
	I, A	0,27	12,120	0	12,000	0,130	11,93
-2	U, B	21,9	32,13	21,80	32,60	44,00	40,90
	I, A	0,27	12,120	0	12,000	0,130	12,00
-1	U, B	10,9	24,30	10,90	24,50	22,10	20,50
	I, A	0,27	12,120	0	12,000	0,130	12,00
0	U, B	0,27	18,43	0,15	18,30	0,00	0,14
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	12,06
1	U, B	11,2	17,50	11,20	16,60	22,10	20,40
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	12,040
2	U, B	22,1	22,00	22,10	20,31	44,00	40,60
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	12,000
3	U, B	32,9	29,20	32,90	27,10	65,60	59,30
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,930
4	U, B	43,5	37,50	43,50	35,10	86,80	78,90
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,800
5	U, B	53,8	46,30	53,80	43,60	107,40	97,90
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,700
6	U, B	63,8	55,00	63,80	52,10	127,40	116,20
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,600
7	U, B	73,4	63,60	73,40	60,40	146,60	133,80
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,400
8	U, B	82,6	71,60	82,60	68,20	165,00	149,80
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,200
9	U, B	91,4	79,60	91,40	76,10	182,50	166,10
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,120	11,100
10	U, B	99,7	87,40	99,70	83,60	199,10	181,60
	I, A	0,27	12,100	0	12,000	0,120	10,800
11	U, B	107,6	94,7	107,5	90,8	214,8	196,1
	I, A	0,27	12,1	0	12	0,12	10,6
12	U, B	115	101,7	114,9	97,6	229,6	209,9
	I, A	0,27	12,1	0	12	0,12	10,4
Позиция	Параметры	W_{1p}		W_{2p}			
		xx	нагр. R	xx	нагр. R		
-12	U, B	199	185,1	132,6	126,8		
	I, A	0,27	11,88	0,2	18,09		
-11	U, B	203,1	188,8	124,1	118,5		
	I, A	0,27	11,09	0,2	18,47		
-10	U, B	207,10	192,40	115,00	109,60		
	I, A	0,270	10,260	0,200	18,82		

-9	<i>U,B</i>	210,90	195,70	105,40	100,30
	<i>I,A</i>	0,270	9,380	0,210	19,17
-8	<i>U,B</i>	214,40	198,80	95,30	90,55
	<i>I,A</i>	0,270	8,460	0,220	19,49
-7	<i>U,B</i>	217,80	202,20	84,60	80,08
	<i>I,A</i>	0,270	7,500	0,220	19,80
-6	<i>U,B</i>	220,80	204,90	73,60	69,49
	<i>I,A</i>	0,270	6,500	0,220	20,07
-5	<i>U,B</i>	223,40	207,20	62,00	58,54
	<i>I,A</i>	0,27	5,400	0,220	20,31
-4	<i>U,B</i>	225,60	209,10	50,10	47,28
	<i>I,A</i>	0,27	4,300	0,230	20,50
-3	<i>U,B</i>	227,40	210,50	37,80	35,79
	<i>I,A</i>	0,27	3,200	0,23	20,67
-2	<i>U,B</i>	228,70	212,00	25,400	23,67
	<i>I,A</i>	0,27	2,100	0,23	20,80
-1	<i>U,B</i>	229,50	212,70	12,700	11,85
	<i>I,A</i>	0,27	0,950	0,23	20,80
0	<i>U,B</i>	229,70	213,00	0,00	0,08
	<i>I,A</i>	0,27	0,250	0,23	20,90
1	<i>U,B</i>	229,50	212,70	12,700	11,80
	<i>I,A</i>	0,270	1,400	0,23	20,900
2	<i>U,B</i>	228,70	211,90	25,400	23,40
	<i>I,A</i>	0,270	2,500	0,23	20,800
3	<i>U,B</i>	227,40	210,50	37,800	34,30
	<i>I,A</i>	0,270	3,600	0,23	20,700
4	<i>U,B</i>	225,60	209,10	50,100	45,60
	<i>I,A</i>	0,270	4,700	0,23	20,500
5	<i>U,B</i>	223,30	207,40	62,020	56,60
	<i>I,A</i>	0,270	5,800	0,23	20,300
6	<i>U,B</i>	220,70	205,20	73,50	67,10
	<i>I,A</i>	0,270	6,800	0,220	20,070
7	<i>U,B</i>	217,70	202,70	84,60	77,30
	<i>I,A</i>	0,270	7,900	0,220	19,800
8	<i>U,B</i>	214,40	199,80	95,20	86,50
	<i>I,A</i>	0,270	8,800	0,210	19,500
9	<i>U,B</i>	210,80	196,90	105,40	95,10
	<i>I,A</i>	0,270	9,700	0,210	19,200
10	<i>U,B</i>	207,00	193,90	114,90	104,80
	<i>I,A</i>	0,270	10,600	0,209	18,800
11	<i>U,B</i>	203	190,6	124	113,2
	<i>I,A</i>	0,27	11,5	0,2	18,5
12	<i>U,B</i>	198,9	187,2	134,6	121,2
	<i>I,A</i>	0,27	12,2	0,2	18,1

Приложение 2. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме "однотрансформаторный с регулированием в нейтрали"

Результаты исследования однотрансформаторного ФРТ с регулированием в нейтрали в режиме холостого хода, представлены в Таблице П2.1.

Таблица П2.1 Результаты опыта холостого хода ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	ψ°	$k_{y,o.e}$	U_{sr}, V	I_{xx}, A	$\Delta P_{xx}, W$	$\Delta Q_{xx}, VAr$	$Z_{xx}, Ом$	$r_{xx}, Ом$	$x_{xx}, Ом$
10	39.6	-0.5	-150.6	0.22	15.5	48.9	1031	3413	1082
9	36	-0.45	-139.5	0.23	16.40	51.8	974	3226	1021
8	32.4	-0.4	-127.6	0.25	17.4	54.9	120	3040	965
7	30.6	-0.35	-114.9	0.26	18.4	58.1	868	2875	910
6	27	-0.3	-101.4	0.28	19.5	61.6	818	2713	858
5	23.4	-0.25	-86.9	0.29	20.6	65.2	774	2568	811
4	18	-0.2	-71.6	0.31	21.8	69	730	2427	765
3	14.4	-0.15	-55.2	0.33	23.1	73.0	690	2290	723
2	10.8	-0.1	-37.8	0.35	24.4	77.1	653	2168	684
1	05.4	-0.05	-19.4	0.37	25.7	81.3	620	2050	650
0	0	0	-0.33	0.39	27.1	85.6	590	1952	618
-1	-3.6	0.05	20.4	0.41	28.4	89.9	561	1863	588
-2	-9	0.1	41.7	0.43	29.7	94.0	536	1781	562
-3	-14.4	0.15	63.9	0.44	31.0	98.1	514	1706	539
-4	-21.6	0.2	86.9	0.46	32.2	101.8	496	1643	520
-5	-27	0.25	110.4	0.48	33.3	105.6	478	1589	501
-6	-32.4	0.3	134.3	0.5	34.3	110	460	1542	482
-7	-39.6	0.35	158.4	0.52	35.0	113.6	445	1511	466
-8	-45	0.4	182.5	0.53	35.6	116.6	433	1486	453
-9	-52.2	0.45	206.4	0.53	36	118.5	427	1469	446
-10	-59.4	0.5	229.7	0.54	36.1	119.1	424	1465	443

Результаты исследования ФРТ в режиме короткого замыкания, представлены в Таблице П2.2.

Таблица П2.2. Результаты опыта короткого замыкания ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	$k_{y,o.e}$	$U_{sc} (V)$	$\Delta P_{sc} (W)$	$\Delta Q_{sc} (VAr)$	$Z_{sc} (Ohm)$	$r_{sc} (Ohm)$	$x_{sc} (Ohm)$
10	-0.5	21.9	25.9	217.5	2.19	0.259	2.17
9	-0.45	21.1	25.7	209.4	02.11	0.257	02.9
8	-0.4	20.2	25.5	200.7	02.2	0.255	2.0
7	-0.35	19.1	25.1	189.4	1.91	0.251	1.89
6	-0.3	17.9	24.9	177.9	1.79	0.249	1.77
5	-0.25	16.4	24.3	162.2	1.64	0.243	1.62

4	-0.2	14.8	24	146.5	1.48	0.24	1.46
3	-0.15	12.9	23.3	126.9	1.29	0.233	1.27
2	-0.1	10.8	22.6	105.6	01.8	0.226	1.06
1	-0.05	08.5	22,0	82.3	0.85	0.22	0.82
0	0	8.45	20.9	82.1	0.845	0.209	0.82
-1	0.05	08.5	22.2	82.2	0.85	0.222	0.82
-2	0.1	11.3	23.0	110	1.13	0.23	1.12
-3	0.15	14.5	24.5	143.5	1.45	0.245	1.43
-4	0.2	17.8	25.6	176.2	1.78	0.256	1.76
-5	0.25	21.4	27.0	212.9	2.14	0.27	02.12
-6	0.3	25.1	28.4	250.1	2.51	0.284	2.49
-7	0.35	28.9	29.8	289.4	2.89	0.298	2.87
-8	0.4	32.7	31.1	326.5	3.27	0.311	3.26
-9	0.45	36.5	32.6	365.2	3.65	0.326	3.64
-10	0.5	40.2	34	403.3	04.2	0.34	04.1

Результаты нагрузочных испытаний ФРТ, при регулировании угла фазового сдвига с помощью средств силовой электроники приведены в Таблице П2.3.

Таблица П2.3. Результаты нагрузочных испытаний ФРТ

Позиция	ψ°		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$
	xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-10	0.5	-59.4	-68.4	229.7	259.6	222.1
-9	0.45	-52.2	-61.2	206.4	235.1	222.9
-8	0.4	-45	-54	182.5	209.5	223.7
-7	0.35	-39.6	-46.8	158.4	183.3	224.5
-6	0.3	-32.4	-39.6	134.3	156.6	225.2
-5	0.25	-27	-32.4	110.4	129.8	225.8
-4	0.2	-21.6	-25.2	86.9	103.5	226.3
-3	0.15	-14.4	-18	63.9	77.6	226.8
-2	0.1	-9	-12.6	41.74	52.6	227.2
-1	0.05	-3.6	-5.4	20.4	28.6	227.5
0	0	0	-1.8	-0.333	08.5	227.6
1	-0.05	05.4	03.6	-19.4	-11.4	227.5
2	-0.1	10.8	07.2	-37.8	-27.2	227.3

3	-0.15	14.4	10.8	-55.2	-42.4	227.1	
4	-0.2	18	14.4	-71.6	-56.9	226.9	
5	-0.25	23.4	18.0	-86.9	-70.6	226.7	
6	-0.3	27	21.6	-101.4	-83.6	226.6	
7	-0.35	30.6	25.2	-114.9	-95.8	226.4	
8	-0.4	32.4	28.8	-127.6	-107.5	226.3	
9	-0.45	36	30.6	-139.5	-118.5	226.2	
10	-0.5	39.6	34.2	-150.6	-128.9	226.1	
Позиция	Параметры	W_1		W_2		W_3	
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-10	U, B	265	259.3	264.8	256.7	132.5	145.8
	I, A	0.542	10.2	0	10	0.544	20.2
-9	U, B	264.6	260.7	264.5	258.1	119.1	131.5
	I, A	0.539	10.2	0	10	0.541	20.1
-8	U, B	263.4	260.9	263.2	258.3	105.3	116.7
	I, A	0.531	10.2	0	10	0.532	20
-7	U, B	261.3	260	261.1	257.4	91.4	101.4
	I, A	0.517	10.2	0	10	0.52	19.9
-6	U, B	258.5	257.9	258.3	255.4	77.5	85.9
	I, A	0.5	10.2	0	10	0.5	19.6
-5	U, B	254.9	254.9	254.8	252.4	63.7	70.4
	I, A	0.481	10.2	0	10	0.483	19.2
-4	U, B	250.8	251	250.6	248.6	50.1	55.1
	I, A	0.464	10.2	0	10	0.465	18.9
-3	U, B	246.1	246.4	245.9	244	36.9	40.1
	I, A	0.447	10.2	0	10	0.448	18.5
-2	U, B	241.1	241.1	240.9	238.7	24.1	25.6

	I,A	0.429	10.2	0	10	0.429	18.1
-1	U,B	235.7	235.3	235.5	233	04.8	11.7
	I,A	0.41	10.2	0	10	0.41	17.7
0	U,B	230	230	229.8	227.7	0	0
	I,A	0.39	10.1	0	10	0.390	17.320
1	U,B	224.2	224.3	224	222	-11.2	-11.1
	I,A	0.371	10.2	0	10	0.371	16.8
2	U,B	218.3	219.3	218.1	217	-21.8	-20.3
	I,A	0.352	10.1	0	10	0.352	16.4
3	U,B	212.4	214.2	212.2	211.9	-31.9	-29.1
	I,A	0.333	10.1	0	10	0.333	15.9
4	U,B	206.5	209.2	206.4	206.9	-41.3	-37.4
	I,A	0.315	10.1	0	10	0.315	15.4
5	U,B	200.7	204.2	200.6	201.9	-50.2	-45.3
	I,A	0.297	10.1	0	10	0.297	15.0
6	U,B	195	199.3	194.9	196.9	-58.5	-52.8
	I,A	0.281	10.1	0	10	0.280	14.6
7	U,B	189.4	194.4	189.3	192.1	-66.3	-59.8
	I,A	0.265	10.1	0	10	0.264	14.2
8	U,B	184	189.7	183.9	187.4	-73.7	-66.5
	I,A	0.25	10.1	0	10	0.25	13.8
9	U,B	178.8	185.1	178.7	182.8	-80.5	-72.8
	I,A	0.236	10.1	0	10	0.236	13.4
10	U,B	173.8	180.6	173.7	178.3	-86.9	-78.8
	I,A	0.223	10.1	0	10	0.222	13.0

Приложение 3. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме "треугольник"

Результаты исследования ФРТ в режиме холостого хода, представлены в Таблице ПЗ.1.

Таблица ПЗ.1. Результаты опыта холостого хода ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	$k_u, o.e$	ψ°	U_{sf}, B	I_{xx}, A	$\Delta P_x, Bm$	$\Delta Q_x, Var$	$z_{xx}, Ом$	$r_{xx}, Ом$	$x_{xx}, Ом$
-10	-1	-61,2	229,6	0,55	48,45	117,6	418,18	1091,85	452,7
-9	-0,9	-55,8	211,7	0,51	45,37	109,9	450,98	1165,97	489,04
-8	-0,8	-50,4	192,6	0,48	42,34	102,4	479,17	1249,41	518,84
-7	-0,7	-45	172,1	0,44	39,44	95,13	522,73	1341,28	569,61
-6	-0,6	-39,6	150,3	0,41	36,7	88,32	560,98	1441,42	608,99
-5	-0,5	-32,4	127,4	0,38	34,22	82,13	605,26	1545,88	657,78
-4	-0,4	-27	103,4	0,36	32,06	76,74	638,89	1650,03	692,94
-3	-0,3	-18	78,42	0,34	30,29	72,34	676,47	1746,45	733,75
-2	-0,2	-12,6	52,71	0,32	28,97	69,07	718,75	1826,03	781,87
-1	-0,1	-5,4	26,49	0,31	28,17	67,05	741,94	1877,88	807,64
0	0	1,8	0,15	0,31	27,9	66,37	741,94	1896,06	806,22
1	0,1	5,4	26,49	0,31	28,47	67,05	741,94	1858,1	809,25
2	0,2	12,6	52,71	0,32	28,97	69,07	718,75	1826,03	781,87
3	0,3	18	78,42	0,34	30,29	72,34	676,47	1746,45	733,75
4	0,4	25,2	103,4	0,36	32,06	76,74	638,89	1650,03	692,94
5	0,5	30,6	127,4	0,38	34,22	82,13	605,26	1545,88	657,78
6	0,6	37,8	150,3	0,41	36,7	88,32	560,98	1441,42	608,99
7	0,7	43,2	172,1	0,44	39,44	95,13	522,73	1341,28	567,61
8	0,8	48,6	192,6	0,48	42,34	102,4	497,17	1249,41	518,84
9	0,9	54	211,8	0,51	45,37	109,9	450,98	1165,97	489,04
10	1	59,4	229,6	0,55	48,45	117,6	418,18	1091,85	452,7

Результаты исследования ФРТ в режиме короткого замыкания, представлены в Таблице ПЗ.2.

Таблица ПЗ.2. Результаты опыта короткого замыкания ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	$k_u, o.e$	$U_{кз}, B$	$\Delta P_{кз}, Bm$	$\Delta Q_{кз}, Var$	$Z_{кз}, Ом$	$r_{кз}, Ом$	$x_{кз}, Ом$
-10	-1	13,9	59,24	155,9	1,16	0,41	1,08
-9	-0,9	13,47	56,77	151,3	1,12	0,39	1,05
-8	-0,8	13,04	54,19	146,8	1,09	0,38	1,02
-7	-0,7	12,61	51,45	142,2	1,05	0,36	0,99
-6	-0,6	12,39	52,22	139,2	1,03	0,36	0,97
-5	-0,5	12,2	53,14	136,3	1,02	0,37	0,95

-4	-0,4	12,06	54,32	134,1	1,01	0,38	0,93
-3	-0,3	9,12	40,46	101,7	0,76	0,28	0,71
-2	-0,2	8,82	37,9	98,82	0,74	0,26	0,69
-1	-0,1	8,59	35,51	96,73	0,72	0,25	0,67
0	0	8,44	33,37	95,53	0,7	0,23	0,66
1	0,1	8,59	35,51	96,73	0,72	0,25	0,67
2	0,2	8,82	37,9	98,82	0,74	0,26	0,69
3	0,3	9,12	40,46	101,7	0,76	0,28	0,71
4	0,4	12,06	54,32	134,1	1,01	0,38	0,93
5	0,5	12,2	53,14	136,3	1,02	0,37	0,95
6	0,6	12,39	52,22	139,2	1,03	0,36	0,97
7	0,7	12,61	51,46	142,2	1,05	0,36	0,99
8	0,8	13,04	54,19	146,8	1,09	0,38	1,02
9	0,9	13,47	56,77	151,3	1,12	0,39	1,05
10	1	13,9	59,24	155,9	1,16	0,41	1,08

В таблице ПЗ.3. приведены расчетные значения суммарной активной и реактивной мощности, полученные в результате опытов холостого хода и короткого замыкания.

Таблица ПЗ.3. Расчетные значения суммарной активной и реактивной мощности при опыте холостого хода и короткого замыкания

Позиция	$k_{y, o.e}$	ψ°	$\Delta P_\Sigma, Bm$	$\Delta Q_\Sigma, Var$
-10	-1	-61,2	107,69	273,5
-9	-0,9	-55,8	102,14	261,2
-8	-0,8	-50,4	96,53	249,2
-7	-0,7	-45	90,89	237,33
-6	-0,6	-39,6	88,92	227,52
-5	-0,5	-32,4	87,36	218,43
-4	-0,4	-27	86,38	210,84
-3	-0,3	-18	70,75	174,04
-2	-0,2	-12,6	66,87	167,89
-1	-0,1	-5,4	63,68	163,78
0	0	1,8	61,27	161,9
1	0,1	5,4	63,98	163,78
2	0,2	12,6	66,87	167,89
3	0,3	18	70,75	174,04
4	0,4	25,2	86,38	210,84
5	0,5	30,6	87,36	218,43
6	0,6	37,8	88,92	227,52
7	0,7	43,2	90,9	237,33
8	0,8	48,6	96,53	249,2

9	0,9	54	102,14	261,2
10	1	59,4	107,69	273,5

Результаты нагрузочных испытаний ФРТ, при регулировании угла фазового сдвига с помощью средств силовой электроники представлены в Таблице ПЗ.4.

Таблица ПЗ.4. Результаты нагрузочных испытаний ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	ψ^o		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$	$\Delta Q, Bar$	$R, Ом$			
	xx	нагр.	xx	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.				
-10	-61,2	-57,6	229,6	216,1	224,5	105,2	267,7	19,07			
-9	-55,8	-52,2	211,7	195,6	224,7	99,87	256	19,07			
-8	-50,4	-46,8	192,6	179,8	225	94,45	244,4	19,07			
-7	-45	-41,4	172,1	159,7	225,3	89,09	233,3	19,06			
-6	-39,6	-36	150,3	138,2	225,2	87,14	223,3	19,06			
-5	-32,4	-30,6	127,4	115,5	225,2	85,88	215	19,01			
-4	-27	-23,4	103,4	91,74	225,1	84,94	207,4	19			
-3	-18	-21,6	78,42	86,07	226,4	69,85	171,7	19,08			
-2	-12,6	-14,4	52,71	60,45	226,6	66,02	165,6	19,1			
-1	-5,4	-7,2	26,49	34,37	226,8	62,95	161,9	19,1			
0	1,8	1,8	0,15	8,39	227	60,57	160,1	19,12			
1	5,4	7,2	26,49	34,36	226,8	62,92	161,8	19,11			
2	12,6	14,4	52,71	60,45	226,6	66,02	165,6	19,1			
3	18	21,6	78,42	86,07	226,4	69,85	171,7	19,08			
4	25,2	27	103,4	113	225,1	85,08	207,6	18,99			
5	30,6	34,2	127,4	136,8	225,2	86,07	215	19,01			
6	37,8	39,6	150,3	159,6	225,2	87,55	223,6	19,04			
7	43,2	46,8	172,1	181,1	225,2	89,49	233,2	19,07			
8	48,6	52,2	192,6	201,4	225	94,89	244,4	19,07			
9	54	57,6	211,8	220,3	224,7	100,3	256	19,07			
10	59,4	63	229,6	237,9	224,5	105,6	267,6	19,08			
Позиция	параметры	W'_{2q}		W''_{2q}		W_{1q}		W_{1p}		W_{2p}	
		xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.
-10	U, B	114,8	108,4	114,8	107,6	229,6	222,7	344,8	344,6	229,6	222,7
	I, A		12		11,77		10,45		7,1		10,45
-9	U, B	105,9	99,65	105,9	98,91	211,8	205,4	353,3	352,7	211,8	205,4
	I, A		12		11,78		10,7		6,56		10,7
-8	U, B	96,3	90,22	96,27	89,54	192,6	186,8	361,5	360,5	192,6	186,8
	I, A		12		11,8		10,94		5,98		10,94
-7	U, B	86,06	80,14	86,03	79,54	172,1	166,9	369,2	367,9	172,1	166,9
	I, A		12		11,82		11,17		5,36		11,17

-6	U, B	75,18	69,36	75,16	68,83	150,4	145,5	376,2	374,5	150,4	145,5
	I, A		11,99		11,82		11,36		4,69		11,36
-5	U, B	63,7	57,97	63,69	57,51	127,4	122,9	382,6	380,3	127,4	122,9
	I, A		12		11,84		11,56		4		11,56
-4	U, B	51,68	46,06	51,67	45,68	103,4	99,26	388	385,2	103,4	99,26
	I, A		12		11,85		11,7		3,27		11,7
-3	U, B	39,22	43,15	39,2	42,92	78,43	78,3	392,4	388,7	78,43	78,3
	I, A		12		11,86		11,68		2,17		11,68
-2	U, B	26,36	30,3	26,35	30,15	52,71	52,58	395,6	392,3	52,71	52,58
	I, A		12		11,86		11,8		1,41		11,8
-1	U, B	13,25	17,22	13,24	17,15	26,49	26,4	397,6	394,6	26,49	26,4
	I, A		12		11,87		11,89		0,63		11,89
0	U, B	0,08	4,21	0,09	4,18	0	0,04	398,2	395,7	0	0,04
	I, A		12		11,87		11,93		0,17		11,93
1	U, B	13,25	17,22	13,24	17,14	26,49	26,4	397,6	394,6	26,49	26,4
	I, A		12		11,87		11,88		0,63		11,88
2	U, B	26,36	30,3	26,35	30,15	52,71	52,58	395,6	392,3	52,71	52,58
	I, A		12		11,86		11,8		1,41		11,8
3	U, B	39,22	43,15	39,2	42,92	78,43	78,3	392,4	388,7	78,43	78,3
	I, A		12		11,86		11,68		1,68		11,68
4	U, B	51,69	56,66	51,67	56,35	103,4	105,3	388	382,5	103,4	105,3
	I, A		12		11,85		11,52		2,91		11,52
5	U, B	63,71	68,61	63,68	68,22	127,4	129,3	382,6	376,8	127,4	129,3
	I, A		12		11,84		11,33		3,62		11,33
6	U, B	75,19	80,02	75,16	79,55	150,4	152,2	376,2	370,3	150,4	152,2
	I, A		12		11,83		11,12		4,29		11,12
7	U, B	86,07	90,84	86,03	90,3	172,1	173,9	369,1	362,9	172,1	173,9
	I, A		12		11,81		10,89		4,93		10,89
8	U, B	96,31	101	96,27	100,4	192,6	194,3	361,5	354,7	192,6	194,3
	I, A		12		11,8		10,64		5,52		10,64
9	U, B	105,9	110,5	105,9	109,8	211,8	213,4	353,3	346	211,8	213,4
	I, A		12		11,78		10,39		6,08		10,39
10	U, B	114,8	119,3	114,8	118,6	229,6	231,2	344,8	337	229,6	231,2
	I, A		12		11,76		10,12		6,6		10,12

Результаты нагрузочных испытаний ФРТ, при использовании конденсаторной батареи представлены в Таблице П3.5.

Таблица ПЗ.5. Данные нагрузочных испытаний ФРТ при использовании конденсаторной батареи

Позиция	$ky, o.e$	ψ^o		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$	$\Delta Q, BA\rho$	I_{load}, A	I_{cond}, A	$R, Ом$
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	нагр. R	нагр. R	нагр. R	нагр. R	нагр. R	нагр. R
-10	-1	-61,2	-59,4	237,5	223,3	230,7	67,81	-1366	12	6,87	19,22
-9	-0,9	-57,6	-54	218,8	205	230,1	63,92	-1135	11,92	6,31	19,3
-8	-0,8	-52,2	-48,6	198,8	185,7	229,5	60,06	-910,6	11,72	5,71	19,59
-7	-0,7	-45	-43,2	177,5	165,1	229,1	56,26	-697,5	11,39	5,08	20,11
-6	-0,6	-39,6	-37,8	154,9	143,3	228,5	53,78	-498,1	10,95	4,41	20,87
-5	-0,5	-34,2	-30,6	131,2	120,4	228,1	51,65	-319,2	10,41	3,7	21,91
-4	-0,4	-27	-25,2	106,4	96,48	227,7	49,9	-165,7	9,77	2,91	23,29
-3	-0,3	-19,8	-19,8	80,14	83	228,2	43,56	-106,5	4,33	2,55	22,64
-2	-0,2	-12,6	-12,6	53,83	57,24	228,1	41,44	0,61	5,12	1,76	24,55
-1	-0,1	-5,4	-7,2	27,04	31,04	228,1	39,84	69,19	5,92	0,95	28,53
0	0	0	0	0,27	4,87	228,2	38,85	97,06	6,73	0,15	23,9
1	0,1	5,4	7,2	27,04	31,03	228,1	39,83	69,15	5,91	0,95	28,56
2	0,2	12,6	12,6	53,83	57,24	228,1	41,42	0,57	5,11	1,76	24,2
3	0,3	19,8	19,8	80,14	83	228,2	43,56	-106,5	4,33	2,55	22,65
4	0,4	25,2	27	106,4	109,4	227,8	49,95	-247,4	3,55	3,36	24,12
5	0,5	32,4	32,4	131,2	133,5	228,3	51,79	-428,1	2,83	4,11	20,54
6	0,6	37,8	39,6	155	156,7	228,9	54,04	-621,2	2,13	4,82	20,87
7	0,7	45	45	177,5	178,6	229,4	56,63	-839,9	1,46	5,5	20,13
8	0,8	50,4	50,4	198,8	199,4	229,9	60,39	-1072	0,79	6,14	19,63
9	0,9	55,8	55,8	218,8	218,9	230,6	64,31	-1314	0,15	6,74	19,34
10	1	61,2	61,2	237,5	237,5	231,1	70,54	-1558	0,01	6,87	19,27
Позиция	Параметры	W'_{2q}		W''_{2q}		W_{1q}		W_{1p}		W_{2p}	
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-10	U, B	118,30	111,60	119,2 0	111,70	234,60	227,40	348,30	347,90	234,60	227,40
	I, A	6,86	6,83	7,31	6,87	6,02	6,10	3,92	4,22	6,02	6,10
-9	U, B	109,00	102,50	109,8 0	102,50	216,00	209,30	356,40	355,70	216,00	209,30
	I, A	6,33	6,88	6,73	6,87	5,68	6,27	3,30	3,92	5,68	6,27
-8	U, B	99,10	92,86	99,69	92,82	196,00	190,10	364,10	363,10	196,00	190,10
	I, A	5,76	6,92	6,12	6,87	5,27	6,42	2,70	3,58	5,27	6,42
-7	U, B	88,51	82,62	88,96	82,52	174,80	169,60	371,40	370,10	174,80	169,60
	I, A	5,14	6,95	5,46	6,87	4,80	6,55	2,12	3,22	4,80	6,55
-6	U, B	77,30	71,73	77,62	71,58	152,50	147,90	378,20	376,50	152,50	147,90
	I, A	4,49	6,97	4,77	6,87	4,26	6,67	1,58	2,83	4,26	6,67
-5	U, B	65,49	60,28	65,70	60,12	129,00	125,00	384,20	382,10	129,00	125,00
	I, A	3,80	6,99	4,03	6,87	3,66	6,77	1,09	2,42	3,66	6,77

-4	U,B	53,13	48,32	53,26	48,16	104,50	101,00	389,30	386,90	104,50	101,00
	I,A	3,07	7,00	3,27	6,87	3,00	6,85	0,66	1,99	3,00	6,85
-3	U,B	40,09	41,56	40,05	41,44	78,48	78,43	391,90	390,50	78,48	78,43
	I,A	2,56	6,99	2,46	6,87	2,39	6,75	0,31	1,18	2,39	6,75
-2	U,B	26,93	28,67	26,90	28,58	52,72	52,66	395,30	393,80	52,72	52,66
	I,A	1,77	7,00	1,65	6,87	1,64	6,84	0,08	0,75	1,64	6,84
-1	U,B	13,53	15,54	13,51	15,49	26,49	26,44	397,40	395,90	26,49	26,44
	I,A	0,98	7,00	0,83	6,87	0,87	6,90	0,13	0,30	0,87	6,90
0	U,B	0,15	2,45	0,13	2,42	0,00	0,02	398,20	396,80	0,00	0,02
	I,A	0,32	7,00	0,05	6,87	0,16	6,93	0,18	0,18	0,16	6,93
1	U,B	13,53	15,54	13,51	15,49	26,49	26,44	397,40	395,90	26,49	26,44
	I,A	0,98	7,00	0,83	6,87	0,87	6,89	0,13	0,30	0,87	6,89
2	U,B	26,93	28,66	26,90	28,57	52,72	52,66	395,30	393,80	52,72	52,66
	I,A	1,77	7,00	1,65	6,87	1,64	6,83	0,08	0,75	1,64	6,83
3	U,B	40,09	41,56	40,05	41,44	78,48	78,43	391,90	390,50	78,48	78,43
	I,A	2,56	6,99	2,46	6,87	2,39	6,74	0,31	1,18	2,39	6,79
4	U,B	53,23	54,76	53,18	54,62	104,20	104,80	387,10	385,40	104,20	104,80
	I,A	3,35	6,99	3,27	6,87	3,12	6,65	0,66	1,60	3,12	6,65
5	U,B	65,63	66,84	65,59	66,70	128,50	129,00	381,60	380,20	128,50	129,00
	I,A	4,10	6,98	4,04	6,87	3,78	6,53	1,09	2,01	3,78	6,53
6	U,B	77,49	78,39	77,46	78,28	151,80	152,10	375,20	374,10	151,80	152,10
	I,A	4,81	6,96	4,77	6,87	4,38	6,39	1,58	2,39	4,38	6,39
7	U,B	88,75	89,35	88,75	89,29	173,90	174,20	368,00	367,30	174,00	174,20
	I,A	5,48	6,92	5,46	6,87	4,91	6,23	2,12	2,74	4,91	6,23
8	U,B	99,38	99,70	99,42	99,71	194,90	195,10	360,20	359,70	194,90	195,10
	I,A	6,11	6,88	6,12	6,87	5,38	6,06	2,70	3,07	5,38	6,06
9	U,B	109,40	109,40	109,50	109,50	214,70	214,70	351,90	351,80	214,70	214,70
	I,A	6,70	6,85	6,73	6,87	5,78	5,91	3,30	3,38	5,78	5,91
10	U,B	118,70	118,70	118,90	118,90	233,20	233,20	343,30	343,30	233,20	233,20
	I,A	7,25	7,26	7,31	6,87	6,12	6,12	3,92	3,92	6,12	6,12

Приложение 4. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме «модифицированный треугольник»

Было выполнено исследование ФРТ по схеме «модифицированный треугольник» на холостом ходу, результаты представлены в таблице П4.1.

Таблица П4.1 Результаты опыта холостого хода ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	U_{sr}, B	ψ°	I_{xx}, A	$\Delta P_{xx}, Bm$	$\Delta Q_{xx}, Var$	U_{1q}, B	$Z_{xx}, Ом$	$r_{xx}, Ом$	$x_{xx}, Ом$
-12	0,14	0	0,397	55,02	72,76	398,2	579,35	961,47	725,94
-11	11,12	1,8	0,386	50,6	72,72	398,1	595,85	1045,45	725,16
-10	22,19	5,4	0,375	46,52	72,59	397,8	613,33	1137,15	728,35
-9	33,21	7,2	0,366	42,78	72,38	397,2	628,42	1236,56	729,67
-8	44,19	10,8	0,357	39,40	72,08	396,4	644,26	1342,64	734,32
-7	55,09	12,6	0,350	36,34	71,71	395,4	657,14	1455,70	736,45
-6	65,89	16,2	0,343	33,69	71,26	394,2	670,55	1570,20	741,57
-5	76,58	18,0	0,337	31,40	70,74	392,7	682,49	1684,71	746,49
-4	87,15	21,6	0,331	29,48	70,14	391,1	694,86	1794,44	753,66
-3	97,58	23,4	0,326	27,93	69,48	389,2	705,52	1894,02	760,23
-2	107,90	27,0	0,321	26,77	68,75	387,2	716,51	1976,09	768,83
-1	118,00	28,8	0,317	25,93	67,97	385,0	725,55	2040,11	776,30
0	127,90	30,6	0,312	25,44	67,13	382,6	737,18	2079,40	788,39
1	137,60	34,2	0,308	25,27	66,24	380,0	746,75	2093,39	799,34
2	147,10	36,0	0,305	25,43	65,31	377,4	754,10	2080,22	809,14
3	156,50	39,6	0,302	25,86	64,33	374,5	761,59	2045,63	820,58
4	165,60	41,4	0,299	26,72	63,32	371,6	769,23	1979,79	834,82
5	174,50	43,2	0,297	27,65	62,28	368,5	774,41	1913,20	846,89
6	183,20	46,8	0,295	28,94	61,22	365,3	779,66	1827,92	862,00
7	191,60	48,6	0,293	30,48	60,13	362,1	784,98	1735,56	880,15
8	199,80	50,4	0,293	32,27	59,02	358,7	784,98	1639,29	894,16
9	207,80	52,2	0,293	34,23	57,90	355,3	784,98	1545,43	911,29
10	215,60	55,8	0,294	36,39	56,77	351,8	782,31	1453,70	928,17
11	223,10	57,6	0,295	38,73	55,64	348,3	779,66	1365,87	950,13
12	230,40	59,4	0,297	41,22	54,50	344,7	774,41	1283,36	971,14

Результаты опыта короткого замыкания представлены в таблице П4.2.

Таблица П4.2 Результаты опыта короткого замыкания ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	$U_{кз}, B$	$\Delta P_{кз}, Bm$	$\Delta Q_{кз}, Var$	$Z_{кз}, Ом$	$r_{кз}, Ом$	$x_{кз}, Ом$
-12	5,610	44,76	49,88	0,468	0,311	0,350
-11	5,575	44,11	49,85	0,464	0,306	0,349
-10	5,575	43,78	50,36	0,464	0,304	0,351
-9	5,650	44,39	50,87	0,471	0,308	0,356
-8	5,750	45,16	51,76	0,479	0,314	0,362
-7	5,510	42,34	50,44	0,459	0,294	0,352

-6	5,571	42,06	51,66	0,476	0,292	0,376
-5	5,645	41,75	53,00	0,470	0,290	0,370
-4	5,815	42,78	54,81	0,484	0,297	0,382
-3	6,000	43,85	56,82	0,500	0,305	0,396
-2	5,850	41,25	56,42	0,488	0,286	0,395
-1	6,000	41,29	58,69	0,500	0,287	0,409
0	6,150	41,17	60,82	0,513	0,286	0,426
1	6,400	42,53	63,68	0,533	0,295	0,444
2	6,640	43,77	66,48	0,553	0,304	0,462
3	7,150	47,17	71,35	0,596	0,328	0,498
4	7,350	47,30	74,14	0,613	0,329	0,517
5	7,560	47,46	77,03	0,630	0,330	0,537
6	7,830	48,64	80,03	0,653	0,338	0,559
7	8,120	50,02	83,41	0,677	0,347	0,581
8	8,620	53,20	88,39	0,718	0,369	0,616
9	8,845	53,37	91,40	0,737	0,371	0,637
10	9,070	53,50	94,35	0,756	0,372	0,658
11	9,380	54,98	98,12	0,782	0,382	0,682
12	9,645	55,93	101,00	0,804	0,388	0,704

В таблице П4.3. приведены расчетные значения суммарной активной и реактивной мощности, полученные в результате опытов холостого хода и короткого замыкания.

Таблица П4.3 Таблица суммарных мощностей при опыте холостого хода и короткого замыкания, при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	$\psi, ^\circ$	$\Delta P_\Sigma, Bm$	$\Delta Q_\Sigma, Var$
-12	0	99,78	122,64
-11	1,8	94,74	122,57
-10	5,4	90,30	122,95
-9	7,2	87,17	123,25
-8	10,8	84,56	123,84
-7	12,6	78,68	122,15
-6	16,2	75,75	122,92
-5	18,0	73,15	123,74
-4	21,6	72,26	124,95
-3	23,4	71,78	126,30
-2	27,0	68,02	125,17
-1	28,8	67,22	126,66
0	30,6	66,61	127,95
1	34,2	67,80	129,92
2	36,0	69,20	131,79
3	39,6	73,03	135,68
4	41,4	74,02	137,46
5	43,2	75,11	139,31
6	46,8	77,58	141,25
7	48,6	80,50	143,54

8	50,4	85,47	147,41
9	52,2	87,60	149,30
10	55,8	89,89	151,12
11	57,6	93,71	153,76
12	59,4	97,15	155,50

Нагрузочные испытания ФРТ проводятся с целью определения мощности всех элементов, составляющих ФРТ. Результаты нагрузочных испытаний устройства представлены в таблицах П4.4, П4.5.

Таблица П4.4 Результаты нагрузочных испытаний ФРТ

Позиция	ψ°		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$
	xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-12	0,0	0,0	0,141	5,75	226,0	102,30
-11	1,8	0,0	11,12	7,86	226,1	97,17
-10	5,4	3,64	22,19	18,19	226,1	92,41
-9	7,2	7,27	33,21	28,93	226,1	89,33
-8	10,8	9,09	44,19	39,67	226,0	86,66
-7	12,6	12,73	55,09	50,57	226,3	80,58
-6	16,2	14,55	65,89	61,18	226,3	77,53
-5	18,0	18,18	76,58	71,67	226,3	74,91
-4	21,6	20,0	87,15	82,0	226,2	73,94
-3	23,4	21,82	97,58	92,18	226,2	73,36
-2	27,0	25,45	107,9	102,40	226,4	69,62
-1	28,8	27,27	118,0	112,30	226,4	68,68
0	30,6	30,91	127,90	122,0	226,4	68,14
1	34,2	32,73	137,60	131,40	226,3	69,12
2	36,0	34,55	147,10	140,70	226,2	70,43
3	39,6	38,18	156,50	149,50	225,8	74,22
4	41,4	40,0	165,60	158,30	225,8	74,99
5	43,2	41,82	174,50	167,0	225,8	76,08
6	46,8	45,45	183,20	175,30	225,7	78,5
7	48,6	47,27	191,60	183,50	225,6	81,14
8	50,4	49,09	199,80	191,20	225,3	86,0
9	52,2	50,91	207,80	198,90	225,3	88,02
10	55,8	52,73	215,60	206,40	225,3	90,24
11	57,6	56,36	223,10	213,60	225,2	93,60
12	59,4	58,18	230,40	220,60	225,1	97,09

Таблица П4.5 Токи и напряжения обмоток в режиме нагрузочных испытаний ФРТ

Позиция	Параметры	W_{1q}		W_{2q}		W'_{3q}		W''_{3q}	
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-12	U, B	398,2	394,9	226,1	264,7	66,53	65,36	66,53	65,36
	I, A		0,23		6,17		12,46		12,22
-11	U, B	398,1	394,9	243,8	242,4	66,51	65,30	66,51	65,28
	I, A		0,65		6,16		12,45		12,22
-10	U, B	397,8	394,6	221,5	220,1	66,46	65,21	66,45	65,16
	I, A		0,97		6,15		12,43		12,22
-9	U, B	397,2	394,0	199,1	197,7	66,36	65,06	66,36	64,98
	I, A		1,29		6,14		12,41		12,22
-8	U, B	396,4	393,2	176,6	175,3	66,23	64,88	66,23	64,77
	I, A		1,54		6,12		12,39		12,22
-7	U, B	395,4	392,5	154,1	152,6	66,06	64,70	66,06	64,57
	I, A		1,88		6,10		12,39		12,23
-6	U, B	394,2	391,3	131,7	130,4	65,86	64,45	65,85	64,30
	I, A		2,21		6,08		12,38		12,23
-5	U, B	392,7	390,0	109,3	107,8	65,62	64,18	65,61	64,00
	I, A		2,54		6,05		12,38		12,23
-4	U, B	391,1	388,3	87,11	86,21	65,34	63,85	65,33	63,66
	I, A		2,86		6,02		12,36		12,23
-3	U, B	389,2	386,5	65,03	64,41	65,04	63,50	65,03	63,28
	I, A		3,18		5,99		12,35		12,22
-2	U, B	387,2	384,7	43,11	42,43	64,70	63,15	64,69	62,91
	I, A		3,49		5,96		12,36		12,24
-1	U, B	385,0	382,6	21,43	21,08	64,33	62,76	64,32	62,49
	I, A		3,80		5,92		12,35		12,24
0	U, B	382,6	380,3	0,0003	0,024	63,93	62,33	63,92	62,04
	I, A		4,11		5,88		12,35		12,24
1	U, B	380,0	377,8	21,16	20,75	63,51	61,87	63,50	61,56
	I, A		4,40		5,84		12,34		12,23
2	U, B	377,4	375,2	42,03	41,16	63,06	61,39	63,05	60,06
	I, A		4,69		5,79		12,34		12,22
3	U, B	374,5	372,3	62,59	60,87	62,59	60,87	62,58	60,52
	I, A		4,97		5,74		12,32		12,21
4	U, B	371,6	369,5	82,79	80,60	62,09	60,36	62,08	59,99
	I, A		5,25		5,70		12,33		12,21
5	U, B	368,5	366,6	102,60	99,96	61,58	59,84	61,57	59,45
	I, A		5,52		5,65		12,33		12,21
6	U, B	365,3	363,5	122,10	118,90	61,05	59,29	61,04	58,88
	I, A		5,78		5,6		12,33		12,20
7	U, B	362,1	360,3	141,20	137,40	60,51	58,73	60,50	58,30
	I, A		6,03		5,54		12,33		12,19
8	U, B	358,7	357,1	159,8	155,10	59,95	58,14	59,94	57,69

	I, A		6,28		5,49		12,32		12,18
9	U, B	355,3	353,9	178,10	172,90	59,38	57,57	59,37	57,10
	I, A		6,52		5,44		12,33		12,18
10	U, B	351,8	350,5	196,00	190,20	58,79	56,99	58,78	56,50
	I, A		6,76		5,38		12,34		12,18
11	U, B	348,3	347,2	213,40	207,00	58,20	56,39	58,19	55,89
	I, A		6,98		5,33		12,34		12,17
12	U, B	344,7	343,8	230,40	223,40	57,60	55,79	57,59	55,27
	I, A		7,2		5,27		12,35		12,16
Позиция	Параметры	W_{1p}		W'_{2p}		W''_{2p}			
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R		
-12	U, B	226,1	264,7	66,51	67,45	66,51	67,46		
	I, A		6,17		12,46		12,22		
-11	U, B	243,8	242,4	60,95	61,87	60,96	61,91		
	I, A		6,16		12,45		12,22		
-10	U, B	221,5	220,1	55,36	56,27	55,37	56,34		
	I, A		6,15		12,43		12,22		
-9	U, B	199,1	197,7	49,75	50,66	49,76	50,75		
	I, A		6,14		12,41		12,22		
-8	U, B	176,6	175,3	44,13	45,04	44,14	45,17		
	I, A		6,12		12,39		12,22		
-7	U, B	154,1	152,6	38,51	39,36	38,52	39,51		
	I, A		6,10		12,39		12,23		
-6	U, B	131,7	130,4	32,90	33,77	32,92	33,96		
	I, A		6,08		12,38		12,23		
-5	U, B	109,3	108,2	27,32	28,22	27,33	28,43		
	I, A		6,05		12,38		12,23		
-4	U, B	87,11	86,21	21,76	22,71	21,77	22,94		
	I, A		6,02		12,36		12,23		
-3	U, B	65,03	64,41	16,24	17,25	16,25	17,51		
	I, A		5,99		12,35		12,22		
-2	U, B	43,11	42,43	10,76	11,75	10,77	12,03		
	I, A		5,96		12,36		12,24		
-1	U, B	21,43	21,08	5,34	6,44	5,35	6,73		
	I, A		5,92		12,35		12,24		
0	U, B	0,0003	0,024	0,037	1,59	0,038	1,69		
	I, A		5,88		12,35		12,24		
1	U, B	21,16	20,75	5,31	4,36	5,30	3,92		
	I, A		5,84		12,34		12,23		
2	U, B	42,03	41,16	10,53	9,39	10,51	8,95		
	I, A		5,79		12,34		12,22		
3	U, B	62,59	60,87	15,67	14,32	15,65	13,86		
	I, A		5,74		12,32		12,21		
4	U, B	82,79	80,60	20,71	19,26	20,70	18,78		

	I, A		5,70		12,33		12,21
5	U, B	102,60	99,96	25,67	24,11	25,66	23,61
	I, A		5,65		12,33		12,21
6	U, B	122,10	118,90	30,54	28,85	30,52	28,33
	I, A		5,6		12,33		12,20
7	U, B	141,20	137,40	35,30	33,50	35,29	32,96
	I, A		5,54		12,33		12,19
8	U, B	159,8	155,10	39,98	37,96	39,96	37,40
	I, A		5,49		12,32		12,18
9	U, B	178,10	172,9	44,54	42,41	44,53	41,83
	I, A		5,44		12,33		12,18
10	U, B	196,00	190,20	49,00	46,76	48,99	46,16
	I, A		5,38		12,34		12,18
11	U, B	213,40	207,00	53,36	50,99	53,34	50,37
	I, A		5,33		12,34		12,17
12	U, B	230,40	223,40	57,60	55,11	57,59	54,47
	I, A		5,27		12,35		12,16

Результаты нагрузочных испытаний устройства при использовании конденсаторной батареи представлены в таблице П4.6.

Таблица 4.6. Результаты нагрузочных испытаний ФРТ при использовании конденсаторной батареи

Позиция	ψ°		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$
	хх	нагр. R	хх	нагр. R	хх	нагр. R
-12	0,0	0,0	0,15	5,813	225,9	103,3
-11	1,8	0,0	11,24	7,949	226,1	95,52
-10	5,4	3,64	22,43	18,39	226,3	88,28
-9	7,2	7,27	33,59	29,25	226,4	82,68
-8	10,8	9,09	44,70	40,11	226,4	77,51
-7	12,6	12,73	55,71	51,12	226,8	69,84
-6	16,2	14,55	65,65	61,86	226,9	64,87
-5	18,0	18,18	77,49	72,49	227,1	60,45
-4	21,60	20,0	88,22	82,97	227,2	57,35
-3	23,40	23,64	98,81	93,30	227,2	54,67
-2	27,0	25,45	109,20	103,70	227,6	50,45
-1	29,09	27,27	119,50	113,70	227,7	48,16
0	32,73	30,91	129,60	123,60	227,9	46,37
1	34,20	32,73	139,60	133,20	228,0	45,58
2	36,0	36,36	149,30	142,70	228,1	45,19
3	40,0	38,18	159,00	151,80	228,1	46,06
4	41,82	40,0	168,30	160,90	228,3	45,91
5	45,45	43,64	177,50	169,70	228,5	46,18
6	47,27	45,45	186,40	178,40	228,7	47,23
7	49,09	47,27	195,20	186,80	228,9	48,62

8	50,91	49,09	203,80	194,80	229,0	51,06
9	54,55	52,73	212,10	202,80	229,2	52,72
10	56,36	54,55	220,10	210,60	229,5	54,70
11	58,18	56,36	228,00	218,10	229,7	57,30
12	60,0	58,18	235,60	225,4	229,9	60,17

Таблица 4.7 Токи и напряжения обмоток в режиме нагрузочных испытаний ФРТ
при использовании конденсаторной батареи

Позиция	Параметры	W_{1q}		W_{2q}		W'_{3q}		W''_{3q}	
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-12	U, B	398,2	394,8	226,1	264,7	66,53	65,35	66,53	65,35
	I, A		0,23		6,24		12,60		12,35
-11	U, B	398,2	394,9	243,9	242,4	66,55	65,33	66,55	65,30
	I, A		0,53		6,06		12,23		12,00
-10	U, B	398,0	394,7	221,6	220,2	66,53	65,27	66,53	65,22
	I, A		0,84		5,87		11,87		11,66
-9	U, B	397,5	394,3	199,2	197,8	66,48	65,16	66,48	65,09
	I, A		1,13		5,68		11,50		11,31
-8	U, B	396,8	393,6	176,8	175,50	66,39	65,02	66,40	64,92
	I, A		1,41		5,49		11,14		10,97
-7	U, B	395,9	392,9	154,4	152,80	66,26	64,87	66,27	64,76
	I, A		1,88		5,31		10,80		10,64
-6	U, B	394,7	391,8	132,0	130,60	66,10	64,67	66,12	64,55
	I, A		1,89		5,13		10,46		10,31
-5	U, B	393,4	390,6	109,6	108,50	65,90	64,44	65,93	64,3
	I, A		2,11		4,95		10,13		9,99
-4	U, B	391,8	389,0	87,37	86,45	65,68	64,16	65,72	64,01
	I, A		231		4,77		9,81		9,68
-3	U, B	390,1	387,3	65,25	64,62	65,42	63,86	65,48	63,70
	I, A		2,48		4,59		9,49		9,38
-2	U, B	388,1	385,6	43,34	42,64	65,12	63,55	65,19	63,38
	I, A		2,65		4,43		9,21		9,10
-1	U, B	386,0	383,6	21,56	21,20	64,79	63,19	64,88	63,02
	I, A		2,80		4,27		8,93		8,84
0	U, B	383,7	381,4	0,008	0,017	64,44	62,81	64,55	62,63
	I, A		2,93		4,12		8,67		8,58
1	U, B	381,3	379,0	21,31	20,89	64,06	62,39	64,20	62,22
	I, A		3,06		3,98		8,42		8,34
2	U, B	378,8	376,5	42,36	41,48	63,66	61,96	63,82	61,78
	I, A		3,17		3,84		8,19		8,12
3	U, B	376,1	373,8	63,25	61,48	63,25	61,49	63,43	61,32
	I, A		3,28		3,72		7,98		7,92
4	U, B	373,3	371,1	83,72	81,47	62,80	61,02	63,00	60,85

	I, A		3,39		3,60		7,80		7,74
5	U, B	370,3	368,3	103,90	101,10	62,32	60,53	62,55	60,37
	I, A		3,49		3,50		7,64		7,59
6	U, B	367,3	365,4	123,70	120,40	61,84	60,02	62,10	59,86
	I, A		3,59		3,41		7,50		7,45
7	U, B	364,2	362,4	143,1	139,20	61,33	59,49	61,62	59,35
	I, A		3,69		3,33		7,39		7,34
8	U, B	361,0	359,3	162,30	157,40	60,83	58,96	61,14	58,82
	I, A		3,80		3,26		7,29		7,25
9	U, B	357,7	356,2	181,00	175,60	60,29	58,41	60,63	58,28
	I, A		3,91		3,21		7,23		7,18
10	U, B	354,3	353,0	199,30	193,30	59,73	57,85	60,11	57,74
	I, A		4,02		3,16		7,19		7,14
11	U, B	350,9	349,7	217,20	210,60	59,18	57,29	59,58	57,19
	I, A		4,15		3,12		7,16		7,12
12	U, B	347,5	346,4	234,70	227,50	58,61	56,71	59,05	56,63
	I, A		4,27		3,09		7,16		7,12

Продолжение таблицы 4.7

Позиция	Параметры	W_{1p}		W'_{2p}		W''_{2p}	
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-12	U, B	226,1	264,7	66,51	67,44	66,51	67,45
	I, A		6,24		12,60		12,35
-11	U, B	243,9	242,4	60,92	61,84	60,93	61,88
	I, A		6,06		12,23		12,00
-10	U, B	221,6	220,2	55,31	56,22	55,32	56,28
	I, A		5,87		11,87		11,66
-9	U, B	199,2	197,8	49,68	50,58	49,68	50,67
	I, A		5,68		11,50		11,31
-8	U, B	176,8	175,50	44,05	44,95	44,04	45,06
	I, A		5,49		11,14		10,97
-7	U, B	154,4	152,80	38,42	39,26	38,41	39,39
	I, A		5,31		10,80		10,64
-6	U, B	132,0	130,60	32,80	33,66	32,78	33,81
	I, A		5,13		10,46		10,31
-5	U, B	109,6	108,50	27,19	28,08	27,16	28,26
	I, A		4,95		10,13		9,99
-4	U, B	87,37	86,45	21,62	22,55	21,57	22,74
	I, A		4,77		9,81		9,68
-3	U, B	65,25	64,62	16,08	17,07	16,02	17,27
	I, A		4,59		9,49		9,38
-2	U, B	43,34	42,64	10,60	11,55	10,52	11,76
	I, A		4,43		9,21		9,10

-1	U,B	21,56	21,20	5,16	6,19	5,06	6,39
	I,A		4,27		8,93		8,84
0	U,B	0,008	0,017	0,52	1,11	0,56	1,18
	I,A		4,12		8,67		8,58
1	U,B	21,31	20,89	5,60	4,49	5,74	4,22
	I,A		3,98		8,42		8,34
2	U,B	42,36	41,48	10,85	9,62	11,01	9,37
	I,A		3,84		8,19		8,12
3	U,B	63,25	61,48	16,06	14,63	16,25	14,37
	I,A		3,72		7,98		7,92
4	U,B	83,72	81,47	21,17	19,63	21,38	19,38
	I,A		3,60		7,80		7,74
5	U,B	103,90	101,10	26,19	24,55	26,43	24,30
	I,A		3,50		7,64		7,59
6	U,B	123,70	120,40	31,12	29,36	31,39	29,12
	I,A		3,41		7,504		7,45
7	U,B	143,1	139,20	35,97	34,08	36,26	33,84
	I,A		3,33		7,39		7,34
8	U,B	162,30	157,40	40,75	38,64	41,07	38,40
	I,A		3,26		7,29		7,25
9	U,B	181,00	175,60	45,4	43,17	45,76	42,94
	I,A		3,21		7,23		7,18
10	U,B	199,30	193,30	49,96	47,61	50,34	47,39
	I,A		3,16		7,187		7,14
11	U,B	217,20	210,60	54,42	51,93	54,83	51,72
	I,A		3,12		7,16		7,12
12	U,B	234,70	227,50	58,77	56,15	59,21	55,95
	I,A		3,09		7,16		7,12

Приложение 5. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме "инвертированный многоугольник"

Результаты исследования ФРТ в режиме холостого хода, представлены в Таблице П5.1

Таблица П5.1 Результаты опыта холостого хода ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{sr}(V)$	0,0952	6,71	13,51	20,41	27,42	34,53	41,74	49,04	56,44	63,92	71,49	79,14	86,86	94,64	102,5
ψ°	1,8	1,8	3,6	5,4	7,2	9	10,8	12,6	14,4	16,2	19,8	21,6	23,4	25,2	27
$I_{xx}(A)$	0,4108	0,3992	0,3883	0,3781	0,368	0,3602	0,3525	0,3458	0,3401	0,3355	0,3319	0,3295	0,3283	0,3284	0,3298
$\Delta P(W)$	30,74	29,91	29,13	28,4	27,74	27,13	26,58	26,11	25,71	25,38	25,14	25,08	24,9	24,92	25,03
$\Delta Q(Var)$	89,29	86,76	84,38	82,16	80,1	78,23	76,56	75,09	73,84	72,82	72,04	71,51	71,25	71,26	71,56
$U_{iq}(V)$	398,3	401,6	404,9	408,1	411,3	414,4	417,5	420,5	423,5	426,4	429,2	431,9	434,6	437,1	439,5
$Z_{xx}(Ohm)$	559,88	576,15	592,33	608,30	623,81	638,53	652,48	665,12	676,27	685,54	692,98	698,03	700,58	700,37	697,39
$r_{xx}(Ohm)$	1720,8	1768,6	1816,0	1862,6	1906,9	1949,8	1990,2	2026,0	2057,5	2084,3	2104,2	2109,2	2124,5	2122,7	2113,4
$x_{xx}(Ohm)$	592,1	609,3	626,5	643,5	660,1	675,8	690,6	704,1	716,0	725,9	733,9	739,7	742,0	741,9	738,7
Позиция	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$U_{sr}(V)$	118,3	126,3	134,3	142,4	150,4	158,4	166,5	174,5	182,5	190,5	198,5	206,3	214,2	221,9	229,6
ψ°	30,6	32,4	36	37,8	49,6	41,4	43,2	45	48,6	50,4	52,2	54	55,8	59,4	61,17
$I_{xx}(A)$	0,3366	0,3421	0,3491	0,3575	0,3674	0,3788	0,3917	0,4061	0,422	0,4393	0,4581	0,4784	0,5	0,523	0,5474
$\Delta P(W)$	25,55	25,96	26,58	27,2	27,83	28,77	29,71	30,77	31,82	33,2	34,57	35,94	37,63	39,2	40,97
$\Delta Q(Var)$	73,04	74,24	75,75	77,59	79,74	82,23	85,04	88,18	91,64	95,43	99,53	103,9	108,7	113,7	119

$U_{1q}(V)$	444	446,1	448,1	449,9	451,5	453,1	454,5	455,7	456,8	457,7	458,4	459	459,4	459,6	459,7
$Z_{xx}(Ohm)$	683,3	672,3	658,8	643,3	626,0	607,1	587,1	566,3	545,0	523,5	502,0	480,7	460,0	439,7	420,1
$r_{xx}(Ohm)$	2070,4	2037,7	1990,2	1944,8	1900,8	1838,7	1780,5	1719,2	1662,4	1593,3	1530,2	1471,9	1405,7	1349,4	1291,1
$x_{xx}(Ohm)$	723,8	712,2	698,2	681,7	663,0	643,2	621,9	599,8	576,9	554,3	531,5	508,6	486,8	465,1	444,3

Результаты исследования ФРТ в режиме короткого замыкания, представлены в Таблице П5.2

Таблица П5.2 Результаты опыта короткого замыкания ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{sc}(V)$	5,396	5,506	5,576	5,725	5,815	5,855	5,965	6,124	6,274	6,482	6,473	6,673	6,873	6,972	7,172
$\Delta P_{sc}(W)$	29,98	30,63	30,76	31,79	32,09	32,36	32,64	33,39	34,05	35,17	35,42	36,4	37,29	37,65	38,26
$\Delta Q_{sc}(VAr)$	57,33	58,82	59,37	61,23	61,71	62,58	63,62	65,63	66,99	69,31	69,44	71,56	73,57	75,08	77,24
$Z_{sc}(Ohm)$	0,450	0,459	0,465	0,477	0,485	0,488	0,497	0,510	0,523	0,540	0,539	0,556	0,573	0,581	0,598
$r_{sc}(Ohm)$	0,208	0,213	0,214	0,221	0,223	0,225	0,227	0,232	0,236	0,244	0,246	0,253	0,259	0,261	0,266
$x_{sc}(Ohm)$	0,399	0,407	0,413	0,423	0,430	0,433	0,442	0,455	0,466	0,482	0,480	0,495	0,511	0,519	0,535
Позиция	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$U_{sc}(V)$	7,672	7,902	8,371	8,591	8,871	9,421	9,711	10,07	10,43	10,77	11,27	11,57	11,92	12,32	12,69
$\Delta P_{sc}(W)$	40,43	41,24	43,75	44,17	45,14	47,4	48,31	49,86	51,5	52,88	55,12	55,86	57,04	58,83	60,31
$\Delta Q_{sc}(VAr)$	83,02	85,13	90,82	92,86	96,09	102,5	105,8	110,5	114,7	118,4	124	127,1	131,2	136	140,1

$Z_{sc} (Ohm)$	0,639	0,659	0,698	0,716	0,739	0,785	0,809	0,839	0,869	0,898	0,939	0,964	0,993	1,027	1,058
$r_{sc} (Ohm)$	0,281	0,286	0,304	0,307	0,313	0,329	0,335	0,346	0,358	0,367	0,383	0,388	0,396	0,409	0,419
$x_{sc} (Ohm)$	0,574	0,593	0,628	0,647	0,669	0,713	0,736	0,764	0,792	0,819	0,858	0,883	0,911	0,942	0,971

Результаты нагрузочных испытаний ФРТ, при регулировании угла фазового сдвига с помощью средств силовой электроники представлены в Таблице П5.3.

Таблица П5.3. Результаты нагрузочных испытаний ФРТ

Позиция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ψ°	0	1,8	3,6	5,4	7,2	9	10,9	12,7	14,6	16,4	18,2	20	21,8	23,6	25,2
$U_{sr} (V)$	5,509	3,234	8,863	15,44	22,22	29,23	36,25	43,37	50,55	57,82	65,36	72,77	80,24	87,91	95,5
$U_r (V)$	227,3	227,3	227,2	227,2	227,1	227,1	227,1	227	226,9	226,9	226,9	226,8	226,7	226,7	226,6
$\Delta P (W)$	61,69	61,23	60,86	60,87	60,98	60,27	60,25	60,34	60,86	61,5	61,31	62,19	63,2	63,3	64,21
$W_{1p}, U(V)$	102,1	96,29	90,36	84,32	78,18	71,84	65,49	59,03	52,48	45,83	38,93	32,1	25,21	18,13	11,12
$W_{1p}, I(A)$	12,37	12,46	12,55	12,64	12,73	12,82	12,91	12,99	13,07	13,15	13,23	13,31	13,38	13,45	13,52
$W_{2p}, U(V)$	197,4	185,7	173,8	161,6	149,3	136,5	123,8	110,8	97,64	84,29	70,41	56,69	42,81	28,56	14,34
$W_{2p}, I(A)$	6,03	6,085	6,14	6,193	6,247	6,302	6,355	6,407	6,458	6,508	6,559	6,607	6,653	6,701	6,746
$W_{1q}, U(V)$	97,29	98,04	98,77	99,49	100,2	100,9	101,6	102,3	102,9	103,5	104,2	104,8	105,3	105,9	106,4

$W_{1q}, I(A)$	12,37	12,46	12,55	12,64	12,73	12,82	12,91	12,99	13,07	13,15	13,23	13,31	13,38	13,45	13,52
$W_{2q}, U(V)$	393,6	396,9	400,1	403,3	406,4	409,6	412,7	415,7	418,5	421,3	424,2	426,9	429,4	432	434,4
$W_{2q}, I(A)$	0,236	0,4281	0,6284	0,8335	1,043	1,256	1,472	1,692	1,914	2,14	2,37	2,602	2,836	3,074	3,313
$W_{3q}, U(V)$	197,4	185,7	173,8	161,6	149,3	136,5	123,8	110,8	97,64	84,29	70,41	56,69	42,81	28,55	14,34
$W_{3q}, I(A)$	6,03	6,085	6,14	6,193	6,247	6,302	6,355	6,407	6,456	6,508	6,559	6,607	6,653	6,701	6,746
Позиция	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ψ°	29	30,9	32,7	36,4	38,2	40	41,8	43,6	45,5	47,3	50,9	52,2	54	55,8	57,8
$U_{sr}(V)$	110,8	118,5	126	133,8	141,5	149	156,7	164,4	172,1	179,7	187,1	194,7	202,2	209,6	216,9
$U_r(V)$	226,4	226,3	226,1	226	225,9	225,7	225,6	225,5	225,3	225,2	225	224,8	224,7	224,5	224,4
$\Delta P(W)$	66,77	68,43	70,96	72,52	74,21	77,09	79,05	81,13	83,73	86,45	90,02	92,57	95,22	98,37	101,6
$W_{1p}, U(V)$	4,025	10,91	18,03	25,36	32,75	39,97	47,42	54,9	62,37	69,85	77,19	84,66	92,11	99,51	106,9
$W_{1p}, I(A)$	13,65	13,7	13,75	13,8	13,84	13,88	13,91	13,94	13,97	13,99	14	14,01	14,01	14,01	14
$W_{2p}, U(V)$	14,45	29,02	43,45	58,22	73,06	87,54	102,5	117,5	132,4	147,4	162,1	177,1	192	206,8	221,5
$W_{2p}, I(A)$	6,83	6,869	6,904	6,94	6,974	7,002	7,031	7,058	7,082	7,103	7,119	7,135	7,149	7,16	7,167
$W_{1q}, U(V)$	107,3	107,7	108,1	108,5	108,8	109,1	109,3	109,6	109,7	109,9	110	110,1	110,1	110,1	110
$W_{1q}, I(A)$	13,65	13,7	13,75	13,8	13,84	13,88	13,91	13,94	13,95	13,99	14	14,01	14,01	14,01	14
$W_{2q}, U(V)$	438,8	440,8	442,6	444,4	446,1	447,4	448,8	450,1	451,1	452	452,7	453,3	453,8	454,1	454,2
$W_{2q}, I(A)$	3,798	4,043	4,287	4,535	4,784	5,031	5,28	5,53	5,779	6,026	6,272	6,518	6,763	7,006	7,246
$W_{3q}, U(V)$	14,45	29,02	43,45	58,22	73,06	87,54	102,5	117,5	132,4	147,4	162,1	177,1	192	206,8	221,5
$W_{3q}, I(A)$	6,83	6,869	6,904	6,94	6,974	7,002	7,031	7,058	7,082	7,103	7,119	7,135	7,149	7,16	7,167

Результаты нагрузочных испытаний ФРТ, при использовании конденсаторной батареи представлены в Таблице П5.4.

Таблица П5.4. Результаты нагрузочных испытаний ФРТ при использовании конденсаторной батареи

Позиция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$I_{\Phi IT}$	11,98	11,78	11,57	11,36	11,14	10,94	10,72	10,5	10,28	10,06	9,845	9,621	9,399	9,191	8,978
I_{cond}	0,165	0,117	0,292	0,49	0,70	0,92	1,14	1,36	1,58	1,81	2,04	2,27	2,51	2,74	2,98
ψ°	0	1,8	3,6	5,4	7,2	9	10,8	12,6	14,4	16,2	18	19,8	21,6	23,4	25,2
$U_{sr}(V)$	5,393	3,831	9,509	16,15	23,01	30	37,11	44,33	51,63	59,02	66,54	74,08	81,7	89,45	97,22
$U_r(V)$	226,9	226,9	226,9	226,9	226,9	227,1	227,2	227,2	227,2	227,2	227,4	227,4	227,4	227,7	227,7
$\Delta P(W)$	35,44	80,14	125,6	172,7	220,5	266,4	314,7	263,4	413,4	463,6	512,4	563,3	614,2	663,8	714,4
$W_{1p}, U(V)$	101,7	95,82	89,85	83,77	77,58	71,3	64,9	58,4	51,79	45,08	38,28	31,38	24,4	17,32	10,18
$W_{1p}, I(A)$	12,16	12,05	11,93	11,8	11,66	11,53	11,38	11,23	11,06	10,89	10,73	10,55	10,37	10,2	10,01
$W_{2p}, U(V)$	196,6	185	173,1	161	148,7	136,2	123,5	110,5	97,36	84,01	70,46	56,73	42,82	28,7	14,43
$W_{2p}, I(A)$	5,928	5,881	5,83	5,773	5,713	5,657	5,593	5,526	5,453	5,378	5,308	5,229	5,148	5,073	4,993
$W_{1q}, U(V)$	97,27	98,06	98,84	99,6	100,3	101,1	101,9	102,6	103,3	104	104,7	105,4	106	106,7	107,3
$W_{1q}, I(A)$	12,16	12,05	11,93	11,8	11,66	11,53	11,38	11,23	11,06	10,89	10,73	10,55	10,37	10,2	10,01
$W_{2q}, U(V)$	393,4	396,8	400,2	403,4	406,6	409,9	413,1	416,2	419,2	422,1	425,2	427,9	430,6	433,4	436
$W_{2q}, I(A)$	0,235	0,420	0,607	0,791	0,971	1,148	1,32	1,487	1,648	1,803	1,955	2,099	2,237	2,372	2,499
$W_{3q}, U(V)$	196,6	185	173,1	161	148,7	136,2	123,5	110,5	97,36	84,01	70,46	56,73	42,82	28,7	14,43

$W_{3q}, I(A)$	5,928	5,881	5,83	5,773	5,713	5,657	5,593	5,526	5,453	5,378	5,308	5,229	5,148	5,073	4,993
Позиция	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$I_{фит}$	8,56	8,357	8,154	7,971	7,798	7,624	7,475	7,34	7,216	7,109	7,013	6,948	6,902	6,873	6,865
I_{cond}	3,468	3,711	3,952	4,197	4,443	4,685	4,931	5,178	5,422	5,666	5,905	6,148	6,39	6,628	6,865
ψ°	28,8	30,6	34,2	36	37,8	39,6	41,4	43,2	46,8	48,6	50,4	52,2	54	57,6	59,4
$U_{sr}(V)$	112,9	120,8	128,6	136,6	144,6	152,5	160,5	168,5	176,5	184,4	192,2	200,1	208	215,8	223,5
$U_r(V)$	227,9	227,9	227,8	228	228,1	228,1	228,3	228,5	228,6	228,8	228,8	229,1	229,4	229,6	229,9
$\Delta P(W)$	815,6	865,9	916,2	965,2	1014	1062	1109	1154	1199	1243	1286	1327	1367	1406	1443
$W_{1p}, U(V)$	4,642	11,91	19,3	26,78	34,33	41,85	49,48	57,14	64,79	72,46	80,07	87,77	95,46	103,1	110,7
$W_{1p}, I(A)$	9,641	9,454	9,262	9,087	8,919	8,746	8,594	8,454	8,323	8,206	8,097	8,017	7,956	7,91	7,884
$W_{2p}, U(V)$	14,56	29,24	43,99	58,94	74	89	104,2	119,5	134,8	150,1	165,3	180,7	196	211,3	226,5
$W_{2p}, I(A)$	4,829	4,748	4,663	4,588	4,516	4,442	4,379	4,322	4,269	4,223	4,181	4,154	4,136	4,125	4,123
$W_{1q}, U(V)$	108,4	108,9	109,4	109,9	110,3	110,7	111,1	111,4	111,7	112	112,2	112,4	112,5	112,7	112,7
$W_{1q}, I(A)$	9,641	9,454	9,262	9,087	8,919	8,746	8,594	8,454	8,323	8,206	8,097	8,017	7,956	7,91	7,884
$W_{2q}, U(V)$	440,7	442,9	444,8	446,9	448,8	450,3	452	453,5	454,8	456	456,9	457,9	458,7	459,3	459,8
$W_{2q}, I(A)$	2,736	2,847	2,95	3,053	3,153	3,247	3,344	3,441	3,537	3,636	3,734	3,843	3,959	4,08	4,209
$W_{3q}, U(V)$	14,56	29,24	43,99	58,94	74	89	104,2	119,5	134,8	150,1	165,3	180,7	196	211,3	226,5
$W_{3q}, I(A)$	4,829	4,748	4,663	4,588	4,516	4,442	4,379	4,322	4,269	4,223	4,181	4,154	4,136	4,125	4,123

Приложение 6. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме "модифицированный многоугольник"

Результаты исследования ФРТ в режиме холостого хода, представлены в Таблице П 6.1

Таблица П 6.1 Результаты опыта холостого хода ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	$k_u, o.e$	$\psi, ^\circ$	U_{sr}, B	I_{xx}, A	$\Delta P_x, Bm$	$\Delta Q_x, Var$	$z_{xx}, Ом$	$r_{xx}, Ом$	$x_{xx}, Ом$
-10	-1	60,0	229,80	0,46	39,60	96,90	500,00	1335,86	539,19
-9	-0,9	56,4	219,50	0,43	37,02	92,07	534,88	1428,96	576,82
-8	-0,8	54,6	209,00	0,41	34,66	87,64	560,98	1526,26	603,20
-7	-0,7	51,0	198,20	0,39	32,53	83,65	589,74	1626,19	632,82
-6	-0,6	47,4	187,20	0,37	30,66	80,10	621,62	1725,38	666,37
-5	-0,5	44,4	176,00	0,36	29,06	77,03	638,89	1820,37	682,29
-4	-0,4	42,0	164,60	0,35	27,73	74,46	666,67	1907,68	711,53
-3	-0,3	38,4	153,00	0,34	26,69	72,41	684,52	1982,02	729,41
-2	-0,2	34,8	141,30	0,33	25,94	70,89	696,97	2039,32	741,63
-1	-0,1	33,0	129,50	0,32	25,49	69,90	712,07	2075,32	758,10
0	0	29,4	117,70	0,32	25,33	69,50	716,51	2088,43	762,81
1	0,1	25,8	105,70	0,32	25,36	69,56	714,29	2085,96	760,25
2	0,2	24,0	93,77	0,33	25,69	70,19	707,69	2059,17	753,60
3	0,3	20,4	81,82	0,33	26,29	71,34	696,97	2012,17	742,96
4	0,4	16,8	69,89	0,34	27,19	73,01	678,47	1945,57	723,91
5	0,5	15,0	58,00	0,35	28,36	75,17	659,03	1865,30	704,46
6	0,6	11,4	46,19	0,36	29,78	77,80	635,36	1776,36	680,37
7	0,7	7,80	34,47	0,38	31,46	80,88	610,08	1681,50	654,69
8	0,8	6,00	22,89	0,39	33,37	84,37	582,72	1585,26	626,59
9	0,9	2,40	11,42	0,41	35,49	88,26	556,90	1490,56	600,38
10	1	0,60	0,14	0,43	37,81	92,50	534,88	1399,10	578,86

Результаты исследования ФРТ в режиме короткого замыкания, представлены в Таблице П6.2.

Таблица П6.2. Результаты опыта короткого замыкания ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	$k_u, o.e$	$U_{кз}, B$	$\Delta P_{кз}, Bm$	$\Delta Q_{кз}, Var$	$Z_{кз}, Ом$	$r_{кз}, Ом$	$x_{кз}, Ом$
-10	-1	6,95	56,58	61,01	0,58	0,39	0,43
-9	-0,9	6,74	55,17	58,92	0,56	0,38	0,41
-8	-0,8	6,52	53,51	56,65	0,54	0,37	0,40
-7	-0,7	5,87	43,9	54,72	0,49	0,30	0,38
-6	-0,6	5,67	42,4	52,84	0,47	0,29	0,37
-5	-0,5	5,48	40,94	51,1	0,46	0,28	0,36
-4	-0,4	5,3	39,52	49,48	0,44	0,27	0,35
-3	-0,3	5,13	38,14	47,99	0,43	0,26	0,34
-2	-0,2	4,57	28,41	46,59	0,38	0,20	0,33
-1	-0,1	4,42	27,04	45,23	0,37	0,19	0,32
0	0	4,3	25,94	44,34	0,36	0,18	0,31

1	0,1	4,28	26,62	43,63	0,36	0,19	0,32
2	0,2	4,27	27,3	42,97	0,36	0,20	0,33
3	0,3	4,68	36,27	42,53	0,39	0,26	0,34
4	0,4	4,73	37,23	42,48	0,39	0,27	0,35
5	0,5	4,78	38,21	42,54	0,40	0,28	0,36
6	0,6	4,83	39,03	42,54	0,40	0,29	0,37
7	0,7	4,89	39,87	42,66	0,41	0,30	0,38
8	0,8	5,43	48,57	42,94	0,45	0,37	0,40
9	0,9	5,51	49,44	43,42	0,46	0,38	0,41
10	1	5,6	50,37	44,07	0,47	0,39	0,43

В таблице 6.3. приведены расчетные значения суммарной активной и реактивной мощности, полученные в результате опытов холостого хода и короткого замыкания.

Таблица 6.3. Таблица суммарных мощностей при опыте холостого хода и короткого замыкания, при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Позиция	$k_u, o.e.$	$\psi, ^\circ$	$\Delta P_\Sigma, Bm$	$\Delta Q_\Sigma, Var$
-10	-1	-61,2	107,69	273,5
-9	-0,9	-55,8	102,14	261,2
-8	-0,8	-50,4	96,53	249,2
-7	-0,7	-45	90,89	237,33
-6	-0,6	-39,6	88,92	227,52
-5	-0,5	-32,4	87,36	218,43
-4	-0,4	-27	86,38	210,84
-3	-0,3	-18	70,75	174,04
-2	-0,2	-12,6	66,87	167,89
-1	-0,1	-5,4	63,68	163,78
0	0	1,8	61,27	161,9
1	0,1	5,4	63,98	163,78
2	0,2	12,6	66,87	167,89
3	0,3	18	70,75	174,04
4	0,4	25,2	86,38	210,84
5	0,5	30,6	87,36	218,43
6	0,6	37,8	88,92	227,52
7	0,7	43,2	90,9	237,33
8	0,8	48,6	96,53	249,2
9	0,9	54	102,14	261,2
10	1	59,4	107,69	273,5

Результаты нагрузочных испытаний ФРТ, при регулировании угла фазового сдвига с помощью средств силовой электроники, представлены в Таблице Пб.4.

Таблица Пб.4. Результаты нагрузочных испытаний ФРТ

Позиция	$\psi, ^\circ$		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$	$\Delta Q, Var$
	хх	нагр.	хх	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.
-10	60,00	58,8	229,80	223,2	225,1	95,54	155,1

-9	56,40	57	219,50	213,2	225,3	91,52	148,4				
-8	54,60	53,4	209,00	202,9	225,4	87,7	142,1				
-7	51,00	49,8	198,20	192,6	226,2	76,15	136,8				
-6	47,40	48	187,20	181,8	226,3	72,78	131,5				
-5	44,40	44,4	176,00	170,8	226,5	69,71	126,8				
-4	42,00	40,8	164,60	159,6	226,6	66,94	122,7				
-3	38,40	39	153,00	148,2	226,7	64,5	119,3				
-2	34,80	35,4	141,30	137	226,7	53,93	116,5				
-1	33,00	31,8	129,50	125,3	227,7	52,21	114,3				
0	29,40	28,2	117,70	113,6	227,8	50,73	112,7				
1	25,80	26,4	105,70	101,7	227,7	51,42	112,1				
2	24,00	22,8	93,77	89,87	227,7	52,45	112				
3	20,40	19,2	81,82	77,91	226,9	61,61	112,4				
4	16,80	17,4	69,89	66,06	226,9	63,22	113,8				
5	15,00	13,8	58,00	54,26	226,8	65,14	115,8				
6	11,40	10,2	46,19	42,54	226,7	67,34	118,5				
7	7,80	8,4	34,47	30,93	226,6	69,81	121,7				
8	6,00	4,8	22,89	19,62	225,9	79,92	125,32				
9	2,40	3	11,42	8,8	225,9	82,79	129,4				
10	0,60	0,6	0,14	5,46	225,8	85,8	134,2				
Позиция	Параметры	W_{1p}		W_{2p}		W_{3p1}		W_{1q}		W_{2q}	
		xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.
-10	U,B	114,9	110,9	88,76	85,79	229,8	225,2	114,9	112,4	318,8	317,7
	I,A		6,69		7,09		6,2		6,69		7,09
-9	U,B	104	100,2	80,32	77,57	208	204,4	115,6	113	320,5	319,3
	I,A		7		6,78		6,23		7		6,78
-8	U,B	92,88	89,3	71,74	69,19	185,8	182,7	116,1	113,6	322	320,8
	I,A		7,33		6,45		6,26		7,36		6,46
-7	U,B	81,61	78,31	63,03	60,75	163,2	160,8	116,6	114,3	323,3	322,6
	I,A		7,66		6,15		6,29		7,66		6,15
-6	U,B	70,19	67,08	54,21	52,12	140,4	138,4	117	114,7	324,4	323,7
	I,A		7,97		5,8		6,3		7,97		5,8
-5	U,B	58,66	55,72	45,3	43,38	117,3	115,7	117,3	115,1	325,3	324,6
	I,A		8,27		5,47		6,3		8,28		5,47
-4	U,B	47,03	44,25	36,31	34,57	94,03	92,85	117,5	115,4	326	325,2
	I,A		8,58		5,13		6,32		8,58		5,13
-3	U,B	35,32	32,71	27,27	25,69	70,62	69,79	117,1	115,6	326,4	325,7
	I,A		8,87		4,78		6,19		8,87		4,78
-2	U,B	23,56	21,09	18,18	16,75	47,1	46,63	117,8	115,9	326,6	326,3
	I,A		9,14		4,41		6,3		9,13		4,4
-1	U,B	11,79	9,48	9,08	7,8	23,55	23,33	117,7	115,9	326,5	326,3
	I,A		9,42		4,06		6,29		9,42		4,06
0	U,B	0,07	2,73	0,1	1,55	0,01	0,018	117,6	115,9	326,2	326

	I, A		9,67		3,7		6,26		9,67		3,7
1	U, B	11,72	14,09	9,083	10,28	23,48	23,33	117,4	115,7	325,7	325,4
	I, A		9,92		3,4		6,24		9,92		3,34
2	U, B	23,4	25,7	18,11	19,21	46,86	46,57	117,2	115,5	325	324,5
	I, A		46,57		2,98		6,21		10,7		2,98
3	U, B	35	37,22	27,07	28,07	70,05	69,56	116,8	115	324	323
	I, A		10,38		2,62		6,16		10,38		2,62
4	U, B	46,5	48,66	35,96	36,87	93,06	92,43	116,4	114,6	322,8	321,7
	I, A		10,61		2,27		6,13		10,61		2,27
5	U, B	57,88	59,99	44,75	45,59	115,8	115,1	115,9	114,1	321,4	320,1
	I, A		10,83		1,92		6,09		10,83		1,92
6	U, B	69,11	71,18	53,43	54,2	138,3	137,4	115,3	113,5	319,8	318,4
	I, A		11,04		1,57		6,05		11,05		1,57
7	U, B	80,17	82,21	61,99	62,69	160,4	159,5	114,6	112,9	318	316,5
	I, A		11,24		1,23		6		11,24		1,23
8	U, B	91,04	92,94	70,39	70,94	182,2	180,9	113,9	112,1	316	314
	I, A		11,43		0,89		5,95		11,43		0,89
9	U, B	101,7	103,6	78,64	79,13	203,5	202,2	113,1	111,3	313,9	311,7
	I, A		11,62		0,56		5,9		11,62		0,57
10	U, B	112,2	114	86,76	87,16	224,5	223,1	112,3	110,5	311,5	309,3
	I, A		11,79		0,25		5,85		11,79		0,25

Результаты нагрузочных испытаний ФРТ, при использовании конденсаторной батареи представлены в Таблице

Таблица Пб.4 Результаты нагрузочных испытаний ФПТ при использовании конденсаторной батареи

Позиция	$k_y(o.e)$	$\psi, ^\circ$		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bn$	$\Delta Q, BA\rho$	I_{load}, A	I_{cond}, A
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	нагр. R	нагр. R	нагр. R	нагр. R	нагр. R
-10	-1	60,0	59,4	233,2	226,5	229,7	52,98	-1439	12,03	6,88
-9	-0,9	56,4	57,6	222,6	216,1	229,6	49,99	-1306	12,02	6,57
-8	-0,8	54,6	54	211,8	205,6	229,4	47,36	-1176	12,01	6,25
-7	-0,7	51,0	50,4	200,8	194,8	229,3	45,08	-1048	12	5,92
-6	-0,6	47,4	48,6	189,6	183,7	229,1	43,8	-923,5	11,99	5,58
-5	-0,5	45,6	45	178,2	172,4	228,9	42,94	-804,1	11,98	5,24
-4	-0,4	42,0	41,4	166,6	160,9	228,7	42,52	-690	11,97	4,89
-3	-0,3	38,4	39,6	154,6	149,9	228,8	39,23	-590,7	11,98	4,56
-2	-0,2	36,6	36	142,7	138,3	228,7	38,66	-489,3	11,98	4,2
-1	-0,1	33,0	32,4	130,8	126,5	228,7	38,44	-394,7	11,97	3,84
0	0	29,4	30	118,8	114,6	228,6	38,55	-307,2	11,97	3,48
1	0,1	25,8	26,4	106,7	102,7	228,5	39,98	-226,7	11,96	3,12

2	0,2	24,0	22,8	94,63	90,66	228,3	41,86	-154,1	11,95	2,76	
3	0,3	20,4	19,2	82,55	78,65	228,2	44,19	-89,5	11,94	2,39	
4	0,4	16,8	17,4	70,63	66,09	227,6	50,97	-25,5	11,91	2	
5	0,5	15,0	13,8	58,61	54,2	227,5	53,16	22,21	11,91	1,65	
6	0,6	11,4	10,2	46,67	42,37	227,5	55,63	61,88	11,91	1,29	
7	0,7	7,80	8,4	34,82	30,64	227,4	58,38	93,47	11,91	0,93	
8	0,8	6,00	4,8	23,10	19,05	227,2	62,86	117,3	11,9	0,58	
9	0,9	2,40	3	11,52	7,87	227,1	67,72	133,4	11,89	0,24	
10	1	0,60	0,6	0,14	5,15	226,9	72,94	142	11,88	0,16	
Позиция	Параметры	W_{1p}		W_{2p}		W_{3p}		W_{1q}		W_{2q}	
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-10	U, B	116,9	112,5	90,15	86,86	232,4	227,6	116,3	114	320,3	320,1
	I, A		3,76		4,2		3,65		3,76		4,2
-9	U, B	105,8	101,6	81,57	78,49	210,2	205,9	116,8	114,6	321,9	321,6
	I, A		3,97		4,04		3,68		3,97		4,04
-8	U, B	94,54	90,49	72,87	69,97	187,6	183,8	117,3	115,1	323,2	323
	I, A		4,2		3,88		3,71		4,2		3,88
-7	U, B	83,12	79,25	64,04	61,33	164,8	161,4	117,7	115,5	324,4	324,2
	I, A		4,45		3,73		3,77		4,45		3,73
-6	U, B	71,56	67,82	55,11	52,54	141,7	138,6	118	115,9	325,4	325,1
	I, A		4,73		3,59		3,84		4,73		3,59
-5	U, B	59,9	56,28	46,1	43,66	118,3	115,6	118,3	116,1	326,2	325,7
	I, A		5,04		3,46		3,93		5,04		3,46
-4	U, B	48,15	44,64	37,02	34,72	94,87	92,38	118,4	116,3	326,8	326,2
	I, A		5,37		3,32		4,02		5,37		3,32
-3	U, B	36,14	33,46	27,74	26,12	70,9	70,11	118,4	116,5	326,9	326,7
	I, A		5,74		3,19		4,14		5,74		3,19
-2	U, B	24,3	21,75	18,59	17,11	47,27	46,78	118,4	116,5	327	326,8
	I, A		6,13		3,05		4,27		6,13		3,05
-1	U, B	12,46	10,02	9,44	8,09	23,62	23,39	118,3	116,5	326,9	326,7
	I, A		6,54		2,89		4,4		6,54		2,89
0	U, B	0,82	1,98	0,43	1,13	0,007	0,02	118,2	116,4	326,6	326,3
	I, A		6,98		2,74		4,54		6,97		2,73
1	U, B	11,22	13,57	8,84	10,02	23,54	23,39	117,9	116,2	326	325,6
	I, A		7,43		2,56		4,69		7,43		2,56
2	U, B	22,96	25,26	17,91	19,01	46,95	46,67	117,6	115,9	325,2	324,8
	I, A		7,9		2,37		4,83		7,9		2,37
3	U, B	34,62	36,88	26,91	27,94	70,19	69,79	117,2	115,5	324,2	323,6
	I, A		8,38		2,16		4,98		8,38		2,16
4	U, B	46,08	48,88	35,76	37,16	93,02	93,66	116,7	114,9	323,1	321,9
	I, A		8,87		1,93		5,13		8,87		1,93

5	U,B	57,53	60,27	44,59	45,91	115,8	116,3	116,1	114,4	321,6	320,5
	I,A		9,39		1,69		5,28		9,39		1,69
6	U,B	68,83	71,54	53,31	54,56	138,3	138,7	115,5	113,8	319,9	318,8
	I,A		9,9		1,43		5,42		9,9		1,43
7	U,B	79,96	82,64	61,9	63,09	160,4	160,8	114,8	113,2	318,1	316,9
	I,A		10,43		1,16		5,57		10,43		1,16
8	U,B	90,91	93,57	70,34	71,48	182,2	182,5	114	112,4	316,1	314,7
	I,A		10,94		0,87		5,7		10,94		0,87
9	U,B	101,7	104,3	78,63	79,71	203,6	203,8	113,2	111,6	313,9	312,4
	I,A		11,46		0,56		5,83		11,46		0,56
10	U,B	112,2	114,8	86,75	87,79	224,5	224,7	112,3	110,7	311,5	309,9
	I,A		11,97		0,25		5,95		11,97		0,25

Приложение 7 Режимные параметры ФРТ, выполненного в гексагональной конфигурации

Результаты исследования фазорегулирующего устройства в режиме холостого хода, представлены в Таблице П7.1

Таблица П7.1 Результаты опыта холостого хода ФРТ

Позиция	1	2	3	4	5	6	7	8	9
kU_{2q}, B	-220	-165	-110	-55	0	55	110	165	220
$L_{W_{2q}}, Гн$	$1.258 \cdot 10^{-3}$	$0.708 \cdot 10^{-3}$	$0.315 \cdot 10^{-3}$	$0.079 \cdot 10^{-3}$	$0.026 \cdot 10^{-6}$	$0.079 \cdot 10^{-3}$	$0.315 \cdot 10^{-3}$	$0.708 \cdot 10^{-3}$	$1.258 \cdot 10^{-3}$
U_{sr}, B	0.206	33.2	65.8	97.4	127.6	156.1	182.7	207.3	229.3
ψ°	0.24	8.4	16.5	24.4	32.2	39.7	46.9	53.6	60
I_{id}, A	0.535	0.417	0.329	0.274	0.25	0.254	0.284	0.334	0.401
$\Delta P_{id}, Bm$	63.8	51.6	42.4	36.4	33.6	33.7	36.5	41.3	47.9
$\Delta Q_{id}, BAp$	105.1	80.8	62.9	51.6	46.7	47.8	54.1	64.7	78.8
U_{1q}, B	331.9	331	328.5	324.4	318.9	312.2	304.6	296.3	287.5
$Z_{id}, Ом$	429.9	551.5	699.1	839.4	920	905.5	809.8	688.6	573.6
$r_{id}, Ом$	829.1	1025.2	1247.6	1453.3	1574.4	1569.7	1449.3	1280.9	1104.4
$x_{id}, Ом$	502.8	654.1	844.1	1028.3	1133.7	1108.5	976.4	816.6	671.2

Результаты исследования ФРТ в режиме короткого замыкания, представлены в Таблице П7.2

Таблица П7.2 Результаты опыта короткого замыкания ФРТ

Позиция	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L_{W_{2q}}, Гн$	$1.258 \cdot 10^{-3}$	$0.708 \cdot 10^{-3}$	$0.315 \cdot 10^{-3}$	$0.079 \cdot 10^{-3}$	$0.026 \cdot 10^{-6}$	$0.079 \cdot 10^{-3}$	$0.315 \cdot 10^{-3}$	$0.708 \cdot 10^{-3}$	$1.258 \cdot 10^{-3}$
U_{sc}, B	9.6	9.1	8.7	8.5	8.5	8.7	8.95	9.4	9.9
$\Delta P_{sc}, Bm$	57.3	57	55.7	54.7	54.1	54.2	53.3	53.5	53.3
$\Delta Q_{sc}, BAp$	99.6	93.5	88.2	85.7	86.1	89.6	93.1	99.8	106.6
$Z_{sc}, Ом$	0.8	0.758	0.725	0.708	0.708	0.725	0.746	0.783	0.825
$r_{sc}, Ом$	0.398	0.396	0.387	0.38	0.376	0.376	0.37	0.372	0.37
$x_{sc}, Ом$	0.694	0.646	0.613	0.597	0.599	0.619	0.648	0.689	0.737

Результаты нагрузочных испытаний ФРТ, представлены в Таблице П7.3

Таблица П7.3 Результаты нагрузочных испытаний ФРТ

Поз.		1		2		3		4		5		6		7		8		9			
$L_{(sr)} (H)$		1.26*10 ⁻³		0.708*10 ⁻³		0.315*10-3		0.079*10-3		0.026*10-6		0.079*10-3		0.315*10-3		0.708*10-3		1.26*10-3			
ψ_{ref}°	I	.6		7.8		16.8		24.		31.2		40.2		47.4		52.8		60.			
ψ°	L	0.		7.2		16.2		23.5		32.4		39.6		46.8		52.4.		58.6			
$U_{sr}(V)$	I	.209		33.2		65.8		97.4		127.6		156.1		182.7		207.3		229.9			
	L	6.1		28.9		61.5		93.		123.1		151.2		177.4		201.5		223.5			
$U_r(V)$	L	226.1		226.2		226.3		226.4		226.5		226.5		226.5		226.5		226.5			
$\Delta P(W)$	L	108.3		95.		85.		78.3		75.		74.7		77		81.5		87.7			
Parameters		U, B		I, A		U, B		I, A		U, B		I, A		U, B		I, A		U, B		I, A	
W_{1p}	I	-265.3		-198.5		-131.3		-64.9		.128		62.4		121.8		177.7		229.8			
	L	-265.8	5.9	-198.4	5.9	-130.9	5.9	-64.4	5.8	1.2	5.8	61.7	5.7	120.	56.	174.6	5.5	225.3	5.4		
W_{2p}'	I	-66.3		-49.6		-32.8		-16.2		0.05		15.6		30.5		44.4		57.5			
	L	-67.7	12.3	-50.8	12.2	-33.9	12.2	-17.3	12.2	1.8	12.2	14.5	12.2	29.1	12.2	42.8	12.2	55.6	12.2		
W_{2p}''	I	-66.3		-49.6		-32.8		-16.2		0.05		15.6		30.4		44.4		57.4			
		-67.7	12.	-50.9	12.	-34.1	12.	-17.5	12.	1.8	12.	14.1	12.	28.6	12.	42.3	12.	54.9	12.		
W_{1q}		331.9		331.		328.		324.4		318.9		312.2		304.6		296.3		287.5			
	L	329.6	.31	329.1	1.2	326.9	2.2	323.	3.1	317.8	4.	311.4	4.8	304.1	5.7	296.2	6.4	287.8	7.2		
W_{2q}	I	265.3		198.5		131.3		64.9		.128		62.4		121.8		177.7		229.8			
	L	265.8	5.8	198.4	5.9	130.9	5.9	64.4	5.8	1.2	5.8	61.7	5.7	120.	5.6	174.6	5.5	225.3	5.4		
W_{3q}	I	132.7		132.4		131.4		129.7		127.5		124.9		121.8		118.5		115.			
	L	130.6	12.	130.3	11.5	129.2	10.9	127.6	10.3	125.4	9.6	122.7	8.9	119.7	8.2	116.5	7.5	113.	6.8		

Результаты нагрузочных испытаний ФРТ, при использовании конденсаторной батареи представлены в Таблице П 7.4

Таблица П 7.4.Результаты нагрузочных испытаний ФРТ при использовании конденсаторной батареи

Position		1		2		3		4		5		6		7		8	
ψ_{ref}°		.6		4.2		9.6		13.2		18.6		24.		27.6		31.2	
ψ°		.6		4.8		10.2		13.8		19.2		22.8		28.2		32.4	
$U_{sr}(V)$		.2		19.3		38.3		57.2		75.8		93.6		111.4		128.6	
		3.		17.3		36.		54.4		72.5		90.4		107.9		125.	
$U_r(V)$		227.6		227.8		228.1		227.8		227.6		227.9		228.2		228.5	
$\Delta P(W)$		60.5		55.9		51.		49.4		48.4		44.5		41.5		39.4	
$R_L(Ohm)$		40.8		36.2		32.6		29.5		27.		24.9		23.2		21.7	
$I_r(A)$		5.6		6.3		7.		7.7		8.4		9.2		9.8		10.5	
$I_c(A)$		0.		.5		1.1		1.6		2.1		2.6		3.1		3.6	
		.1		.5		1.		1.5		2.1		2.6		3.		3.5	
Parameters		$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$
W_{1p}		-265.5	.2	-227.3	.3	-188.9	.5	-150.3	.8	-111.9	1.	-74.6	1.3	-37.	1.5	0.	1.7
		-265.2	2.9	-227.	3.	-188.6	3.	-150.4	3.1	-112.3	3.2	-74.5	3.3	-37.	3.4	0.	3.5
W_{2p}'		-66.4	.5	-56.8	.5	-47.1	.9	-37.5	1.4	-27.8	2.	-18.5	2.5	-9.1	3.	.4	3.5
		-66.8	5.9	-57.2	6.	-47.7	6.1	-38.1	6.4	-28.6	6.5	-19.2	6.8	-9.8	7.	.8	7.3
W_{2p}''		-66.4	0.	-56.8	.5	-47.1	1.1	-37.4	1.6	-27.8	2.1	-18.4	2.5	-9.	3.1	.4	3.6
		-66.8	5.6	-57.3	5.8	-47.7	6.	-38.2	6.2	-28.7	6.4	-19.3	6.7	-9.9	6.9	.8	7.2
W_{1q}		332.	.3	331.8	.3	331.	.2	329.8	.1	328.	.3	325.7	.5	322.8	.8	319.4	1.1
		330.6	.3	330.5	.5	329.9	.8	328.4	1.1	326.4	1.4	324.3	1.7	321.7	2.	318.7	2.4
W_{2q1}''		38	.2	38.	.4	37.9	0.	37.8	0.	37.6	1.1	37.3	1.3	37.	1.5	36.6	0.
		38.	2.7	38.	2.8	37.7	0.	37.6	0.	37.1	3.1	37.3	3.2	37.	3.3	36.3	0.
W_{2q2}''		38.	.2	38.	0.	37.9	0.	37.8	.9	37.6	1.1	37.3	1.3	37.	0.	36.6	0.
		38.	2.7	38.	0.	37.7	0.	37.4	3.	37.1	3.1	37.3	3.2	36.7	0.	36.3	0.
W_{2q}'		189.5	.2	189.3	.4	188.9	.6	188.2	.9	187.2	1.1	186.1	0.	184.5	0.	182.6	0.
		189.2	2.7	189.1	2.8	188.6	2.9	187.7	3.	186.5	3.1	184.6	0.	183.	0.	181.1	0.
W_c		132.8	.1	132.8	.5	132.5	1.	132.1	1.5	131.4	1.9	130.5	2.3	129.4	2.6	128.1	2.9

		131.7	5.7	131.6	5.7	131.3	5.7	130.6	5.7	129.7	5.7	128.8	5.7	127.6	5.7	126.3	5.7
Position		9		10		11		12		13		14		15			
ψ_{ref}°		36.6		40.2		45.6		49.2		53.4		57.		60.6			
ψ°		36.		41.4		45.		48.6		52.2		55.8		59.4			
$U_{sr}(V)$		145.4		161.6		177.1		192.		206.2		219.8		232.8			
		141.1		156.6		171.		185.7		199.7		212.5		224.6			
$U_r(V)$		228.2		228.		227.8		228.1		228.4		228.2		228.			
$\Delta P(W)$		42.5		46.8		53.		55.		58.2		67.4		78.2			
$R_L(Ohm)$		20.3		19.2		18.2		17.4		16.6		15.9		15.2			
$I_r(A)$		11.2		11.9		12.5		13.1		13.8		14.4		15.			
$I_c(A)$		4.1		4.6		5.		5.4		5.8		6.2		6.6			
		4.		4.4		4.8		5.2		5.5		6.		6.4			
Parameters		$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$
W_{1p}		36.3	1.9	71.7	2.1	105.8	2.3	139.1	2.5	171.3	2.6	202.4	2.7	232.2	2.8		
		35.6	3.6	70.2	3.7	102.6	3.8	135.7	3.9	167.7	4.	197.6	4.1	226.1	4.3		
W_{2p}'		9.3	3.9	18.1	4.4	26.6	4.8	34.9	5.2	43.	5.6	50.7	5.9	58.2	6.2		
		8.3	7.6	16.9	7.9	25.	8.3	33.2	8.6	41.2	9.1	48.7	9.5	55.8	10.		
W_{2p}''		9.4	4.1	18.2	4.6	26.8	5.	35.1	5.4	43.2	5.8	51.	6.2	58.4	6.6		
		8.1	7.5	16.7	7.8	24.8	8.2	33.	8.5	41.	9.	48.4	9.4	55.5	9.9		
W_{1q}		315.9	1.4	312.1	1.7	308.1	2.1	303.4	2.4	298.6	2.8	293.8	3.2	289.	3.6		
		315.	2.9	311.	3.3	306.9	3.8	302.7	4.2	298.3	4.8	293.5	5.4	288.6	6.		
W_{2q1}''		36.3	0.	35.8	2.1	35.4	2.2	34.9	2.3	34.3	0.	33.8	0.	33.2	2.7		
		35.9	0.	35.1	3.7	35.3	3.9	34.8	3.9	33.8	0.	33.3	0.	32.2	4.5		
W_{2q2}''		36.3	1.8	35.8	2.1	35.4	2.2	34.9	0.	34.3	0.	33.7	2.6	33.2	2.7		
		35.6	3.6	35.1	3.7	35.3	3.9	34.4	0.	33.8	0.	32.8	4.3	32.2	4.5		
W_{2q}'		180.7	0.	178.6	0.	176.6	2.2	174.	2.4	171.3	2.5	168.6	2.6	165.9	2.7		
		178.9	0.	176.5	0.	173.1	3.9	170.5	4.	167.7	4.2	164.8	4.3	161.7	4.5		
W_{3q}		126.8	3.1	125.3	3.4	123.7	3.5	121.9	2.7	120.	3.7	118.1	3.8	116.2	3.8		
		124.7	5.7	123.	5.7	121.2	5.7	119.4	5.7	117.5	5.7	115.5	5.7	113.3	5.7		

ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Нижеподписавшаяся, Голуб Ирина, заявляю о личной ответственности за предоставленный материал в диссертационной работе и гарантирую, что данный материал получен в результате проведенных мною исследований; в противном случае, уведомлена о правовых последствиях, предусмотренных действующим законодательством.

Дата

_____ Голуб Ирина

ОБ АВТОРЕ

Фамилия, имя:	Голуб Ирина
Дата и место рождения:	04.10.1967, г. Кишинев, Республика Молдова
Гражданство:	Республика Молдова
Образование:	Высшее: • 1984–1989 Технический Университет Республики Молдова, Кишинёв, специальность "Электроснабжение промышленных предприятий"; • 2013–2015 Мастерат, Университет Академии Наук Республики Молдова, Кишинёв; • 2019 аспирантура, Технический Университет Республики Молдова, Кишинёв.
Профессиональная деятельность:	10/1989–2012 Инженер Институт Энергетики Академии Наук, Кишинев (Молдова) 06/2012– настоящее время Научный сотрудник Институт Энергетики, Министерство Образования, Культуры и Исследований, Кишинёв (Республика Молдова)
Область научных интересов:	Моделированием режимов объединенных энергосистем, FACTS – контроллеров и систем управления
Участие в научных форумах:	The 12th Wec Central & Eastern Europe Regional Energy Forum FOREN 2014 Международная конференция "Energy of Moldova – 2016. Опубликовано 10 научных статей
Научные и научно-методические работы:	
Контактная информация	
E-mail:	irina.golub@mail.ru
Тел.	0 795 936 15