

ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ МОЛДОВЫ



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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

CHIȘINĂU, 2021

Диссертация разработана в Департаменте «Электроэнергетика и Электротехника», Технического Университета Молдовы (ТУМ),
Докторальная школа „Компьютерные науки, электроника и энергетика”

Научный руководитель:

Берзан Владимир, д.х.т.н., профессор

Официальные референты:

Зайцев Дмитрий, д.т.н., доцент

Стратан Ион, д.т.н., профессор

Попеску Виктор, д.т.н., доцент

Состав Докторальной Комиссии:

Киорсак Михаил, д.х.т.н, профессор , председатель

Гуцу-Кетрушка Корина, д.т.н. лектор университета, секретарь

Арион Валентин, д.х.т.н, профессор

Защита состоится 9 сентября 2021г., в 12⁰⁰ на заседании Докторской Комиссии в докторальной школе „Компьютерные науки, электроника и энергетика” Техническом Университете Молдовы (утверждено решением Докторской Комиссии (ДК) 221.01 от 09.06.2021 № 02): MD-2012, Республика Молдова, г. Кишинев, ул. 31 Августа 1989, № 78, учебный блок № 2, каб. 2-211.

С текстом диссертации и автореферата можно ознакомиться в научно технической библиотеке Технического Университета Молдовы и на сайте С.Н.А.А. (www.cnaa.md).

Автореферат был разослан июня 2021.

**Ученый секретарь
Докторальной Комиссии,**
д.т.н. лектор университета

Гуцу- Кетрушка Корина

Научный руководитель:

д.х.т.н., профессор

Берзан Владимир

Автор:

Голуб Ирина

© GOLUB IRINA, 2021

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность и значимость

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

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

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 тенденций развития средств управления режимами 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 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 предложений по применению предлагаемых устройств.

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

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

Разработаны и исследованы схемы FACTS контроллеров на основе 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. 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 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.

Теоретическая и практическая ценность результатов работы.

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

Предполагается, что 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 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 (межгосударственных) 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 (патент).
2. Способы секционирования обмоток управления и законы коммутации средствами силовой электроники для реализации требуемых стратегий регулирования.
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 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 "ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА КАК ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ" дана характеристика фазорегулирующего трансформатора, описана специфика и особенности таких устройств, к которым относятся: значительные габариты; повышенная типовая мощность устройства, достигающая в классическом варианте 2.15 от проходной; высокая стоимость (2-5\$/кВА); использование только в целях, оправдывающих затраты на изготовление.

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.

В главе представлены и изучены способы создания вольтодобавочного напряжения, которые использованы далее при разработке схемных вариантов ФРТ: поперечное, продольно-поперечное и симметричное регулирование.

Также описаны типовые конфигурации (одно и двухтрансформаторные) и варианты схемного исполнения ФРТ (симметричные и несимметричные) в зависимости от номинального напряжения, выходной мощности и угла фазового сдвига, величина которого напрямую влияет на мощность и размер трансформаторного устройства.

Важным элементом ФРТ является устройство, осуществляющее регулирование угла фазового сдвига. Средства управления ФРТ могут быть выполнены на основе электромеханических переключателей, или с использованием средств силовой

электроники. ФРТ, управляемые механическими устройствами РПН, не имеют достаточного быстродействия, поскольку переключение только одной ступени регулирования занимает до 5,4 с. Быстродействующие ФРТ, управляемые средствами силовой электроники, позволяют плавно подстраиваться под текущий режим работы ЭЭС, обеспечивая ее устойчивость в переходных процессах с оптимальными параметрами.

Одним из сдерживающих факторов практического применения ФРТ является достаточно высокая стоимость силовых полупроводниковых элементов, что вынуждает ограничивать функциональные свойства средств управления способностью 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.

Проанализирован опыт разработки, производства и внедрения фазорегулирующих устройств в мировой практике. Оценены перспективы роста мирового рынка фазорегулирующих трансформаторов. Показано, что в ближайшее время динамика роста составит примерно 6,8% и достигнет 100 млн. долл. США к 2023 году по сравнению с 73 млн. долл. США в 2019 году. Выполнен обзор литературы по теме исследования.

Во второй главе "МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ" 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 с диапазоном регулирования угла $\psi = 0 \div \pm 60^\circ$: "однотрансформаторный с регулированием в нейтрали" (рис.1), "треугольник" (рис.5,6), "звезда" (рис.8). Для каждого ФРТ были созданы математические модели, определяющие соотношения между режимными параметрами.

Устройство (рис.1) представляет собой трехфазный трехобмоточный трансформатор, содержащий трехфазные системы первичных (W_1) и вторичных (W_2) обмоток, а также трехфазную систему обмоток управления (W_3) с регулировочными

ответвлениями. Дополнительный переключатель S устанавливает знак регулирования фазового сдвига. Векторная диаграмма напряжений, поясняющая работу устройства, приведена на рис.2 и позволяет получить основные выражения, характеризующие режимные параметры устройства.

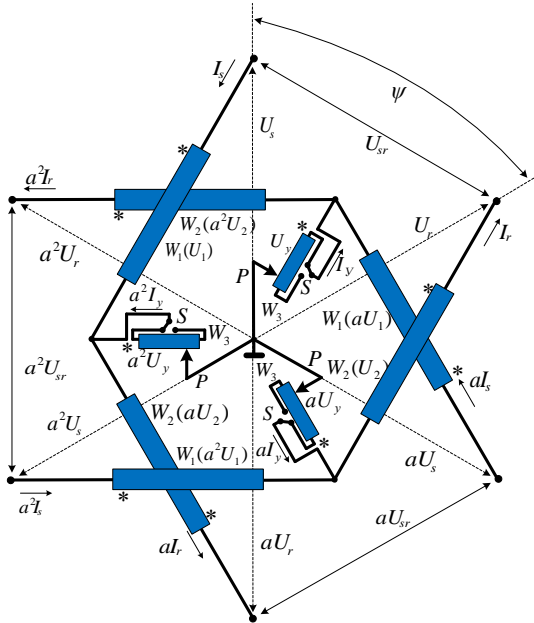


Рис.1. ФРТ, выполненный по "однотрансформаторной схеме с регулированием в нейтрали"

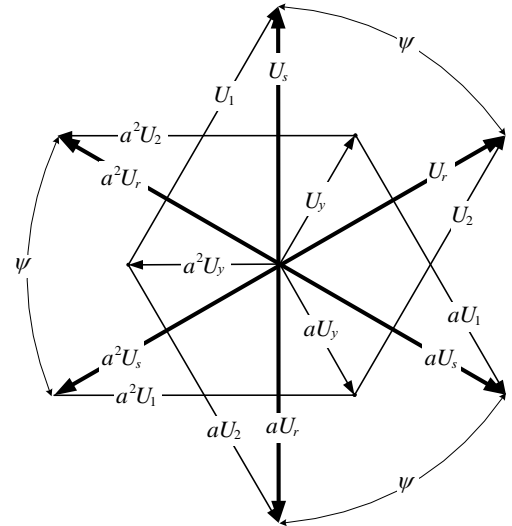


Рис.2. Векторная диаграмма напряжений

В целях привязки режима к реальному состоянию устройства введено понятие коэффициента управления $k_y = \frac{W_3}{W_1} = \frac{W_3}{W_2}$, который является независимой координатой управления. Комплексный коэффициент преобразования по напряжению определен, исходя из выражений для напряжений на шинах устройства:

$$U_s = U_1 + a^2 U_y = (1 + a^2 k_y) U, \quad U_r = U_2 + a U_y = (1 + a k_y) U,$$

где a - комплексный оператор трехфазной системы. Тогда: $U_r = \frac{1 + a k_y}{1 + a^2 k_y} U_s$. Сомножитель,

стоящий перед напряжением U_s , является его комплексным коэффициентом

преобразования по напряжению: $\dot{K} = \frac{1 + a k_y}{1 + a^2 k_y}$. При $k_y = 0$ получаем $\dot{K} = 1$. Это означает,

что $U_s = U_r$, а угол $\psi = 0^\circ$. Соответственно при $k_y = 1$ получаем $K = \frac{1 + a}{1 + a^2} = a$. Это

означает, что $U_s = a U_r$, а угол $\psi = 120^\circ$.

Из уравнения электромагнитного баланса определен комплексный коэффициент преобразования по току нагрузки. При описанных выше условиях получаем:

$$\frac{I_s - I_r}{k_y} = a^2 I_r - a I_s, \text{ или } I_r = \frac{1 + a k_y}{1 + a^2 k_y} I_s. \text{ Таким образом, коэффициент преобразования по}$$

току полностью соответствует коэффициенту преобразования по напряжению. При равенстве модулей входного и выходного напряжений, как это имеет место в режиме

$$\text{холостого хода, можно записать: } \dot{K} = \frac{1 + a k_y}{1 + a^2 k_y} = e^{j\psi} = \cos\psi + j \sin\psi.$$

Основными показателями, определяющими энергетические и стоимостные характеристики устройства являются токи и напряжения в его элементах.

Напряжение U_{sr} между входными и выходными клеммами устройства:

$$U_{sr} = -\frac{3}{2} k_y \frac{k_y - j \frac{2}{\sqrt{3}} (1 - \frac{k_y}{2})}{1 - k_y + k_y^2} U_s.$$

Изменяющиеся при регулировании угла ψ напряжения обмоток W_1 , W_2 и W_3 :

$$|U_1| = |U_2| = \frac{\frac{k_y}{2} + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}}}{\sqrt{1 - k_y + k_y^2}} U_s, \quad |U_3| = |U_y| = \frac{k_y}{\sqrt{1 - k_y + k_y^2}} U_s.$$

Ток в обмотке управления характеризуется соотношением: $I_y = \frac{\frac{k_y}{2} + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}}}{\sqrt{1 - k_y + k_y^2}} I_s.$

Важнейшей характеристикой устройства является его расчетная (типовая) мощность, которая может рассматриваться в качестве показателя, позволяющего проводить сравнение различных проектных решений:

$$S_{PST} = \frac{(\frac{\sqrt{3}}{2} k_y + \sqrt{1 - k_y + k_y^2})(\frac{k_y}{2} + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}})}{1 - k_y + k_y^2} U_s I_s = (1 + \sin \frac{\psi}{2})(\cos \frac{\psi}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\psi}{2}) U_s I_s.$$

На рис.3 приведены графики изменения расчетной мощности известного классического двухтрансформаторного устройства S_N и рассматриваемого ФРТ S_{PST} , которые доказывают эффективность применения устройства на диапазонах регулирования более $\pm 50^\circ$.

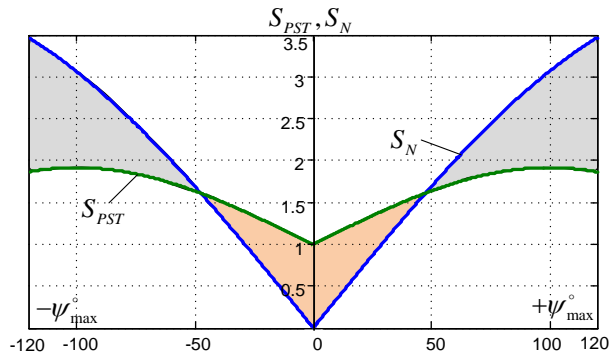


Рис.3. Графики изменения расчетной мощности

На основе структурно-имитационной модели в среде Matlab/Simulink, для ФРТ (рис.1) были определены режимные параметры. На рис.4, для примера, представлены графики токов и напряжений в элементах устройства в режиме нагрузки.

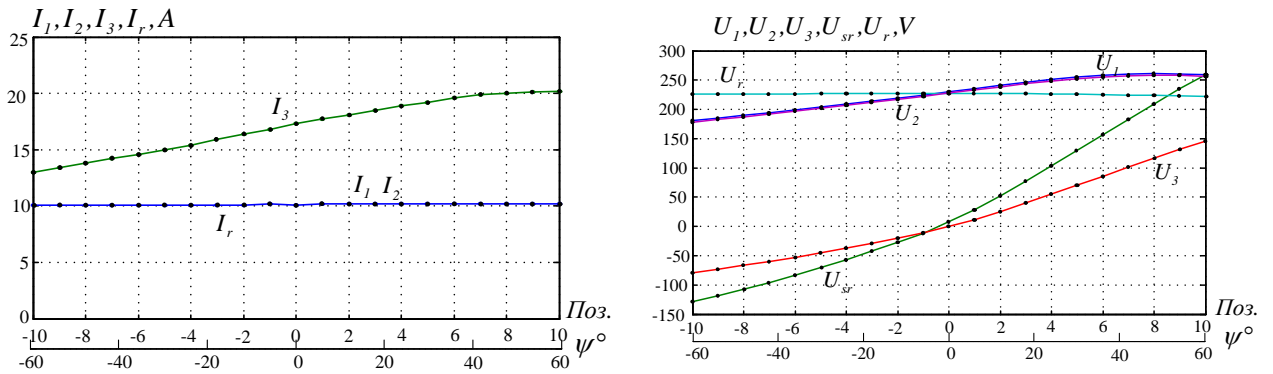


Рис.4. Графики токов и напряжений в элементах устройства, выполненного по схеме "однотрансформаторный с регулированием в нейтрали"

Линиями показаны характеристики, полученные на основе математической модели, а точками - при структурно-имитационном моделировании. Видно соответствие данных, полученных при различных видах моделирования.

Основными элементами устройства выполненного по схеме "треугольник" (рис.5,6) являются два силовых трансформатора, один из которых "р" выполняет функции параллельного (или намагничивающего), другой "q" – функции последовательного (или фазосдвигающего) элемента. 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 позволяет добиться стабильности выходного напряжения в процессе регулирования угла ψ .

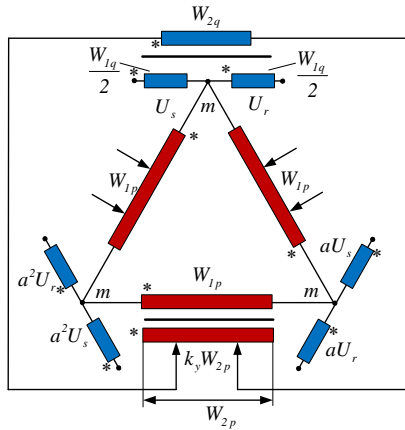


Рис.5. ФРТ, выполненный по схеме "треугольник"

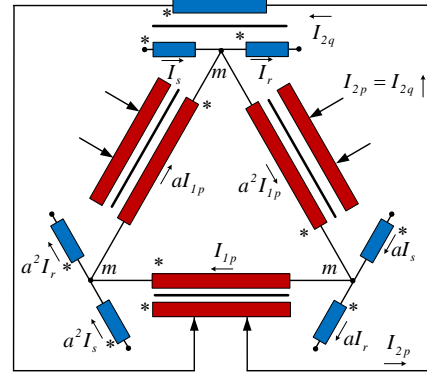


Рис.6. Распределение токов по обмоткам устройства

Изменение угла фазового сдвига между входом U_s и выходом U_r устройства осуществляется путем взаимного перемещения регулировочных контактов на обмотке низкого напряжения W_{2p} . Исходя из рис.5,6 может быть записано уравнение электромагнитного баланса фазосдвигающего трансформатора: $I_s \frac{W_{1q}}{2} + I_r \frac{W_{1q}}{2} = I_{2q} W_{2q}$, а также получены выражения, характеризующие режимные параметры устройства.

Выражения для токов и напряжений для возбуждающего и фазосдвигающего элементов:

$$I_{1p} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \frac{\psi}{2} I_s, \quad U_{1p} = \sqrt{3} \cos \frac{\psi}{2} U_s, \quad I_{2p} = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s, \quad U_{2p} = 2k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s,$$

$$I_{1q} = I_s, \quad U_{1q} = \frac{U_{2q}}{k_q} = 2 \sin \frac{\psi}{2} U_s, \quad I_{2q} = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s, \quad U_{2q} = U_{2p} = 2k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s,$$

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

Исследование ФРТ (рис.5) было проведено по аналогии с ФРТ (рис.1), т.е. с использованием двух видов моделей.

На рис.7 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.

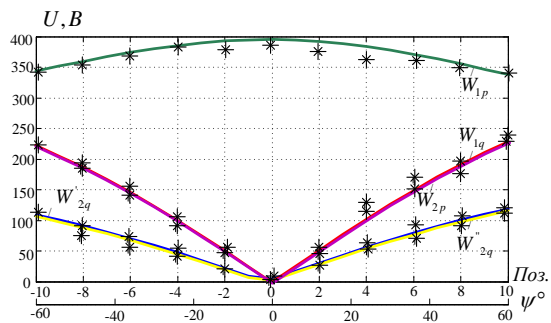
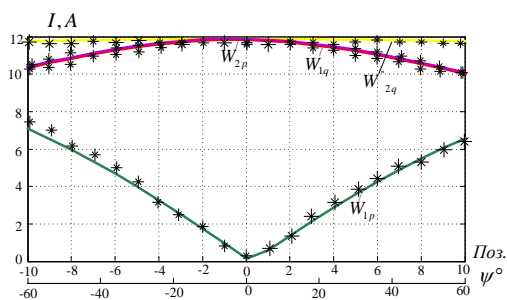


Рис.7. Графики токов и напряжений в элементах устройства, выполненного по схеме "треугольник"

ФРТ выполненный по схеме "звезда" рис.8 также имеет двухтрансформаторную конфигурацию. Схему электрических соединений устройства на стороне высокого напряжения характеризует рис.8а, схему электрических соединений на стороне низкого напряжения – рис.8б.

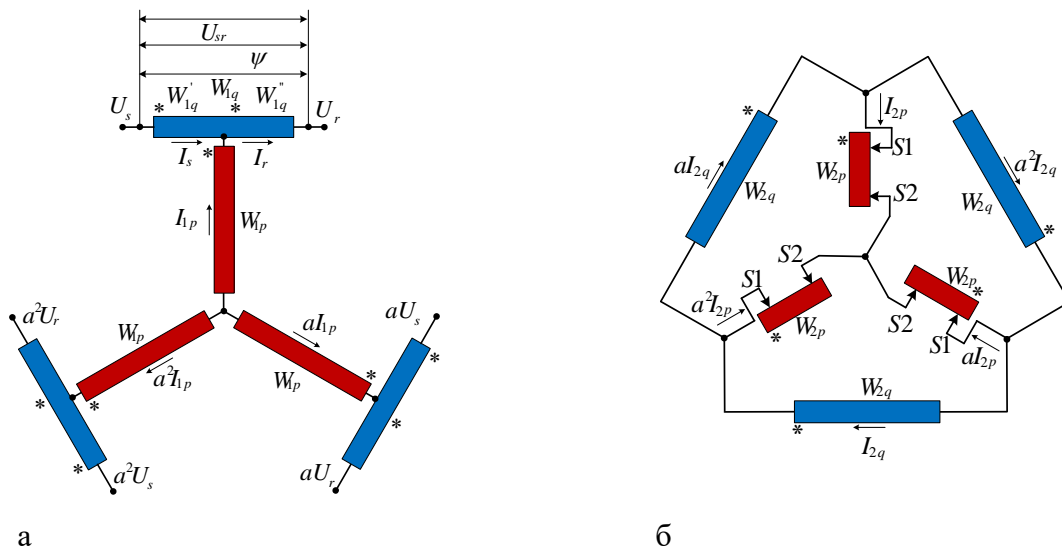


Рис.8. ФРТ выполненный по схеме "звезда"

Регулирование фазового сдвига ψ выходного напряжения U_r относительно напряжения на входе U_s осуществляется 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 подключаются высоковольтные выводы обмоток W_{1p} намагничивающего трансформатора, соединенные в звезду.

Для ФРТ рис.8 получены выражения, характеризующие токи и напряжения для возбуждающего и фазосдвигающего элементов:

$$I_{1p} = 2 \sin \frac{\psi}{2} I_s, \quad U_{1p} = \cos \frac{\psi}{2} U_s, \quad I_{2p} = \frac{\sqrt{3}}{k_q} \cos \frac{\psi}{2} I_s, \quad U_{2p} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s.$$

$$I_{1q} = I_s, \quad U_{1q} = 2 \sin \frac{\psi}{2} U_s, \quad I_{2q} = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s, \quad U_{2q} = 2 k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s.$$

Расчетная мощность устройства: $S_{\text{ФРТ}} = S_p + S_q = 4U_s I_s \sin \frac{\psi_{\text{max}}}{2}$.

Исследование ФРТ (рис.8) было проведено по аналогии с ФРТ (рис.1,5), также на основе как математических, так и SPS моделей. На рис.9,10 приведены кривые изменения режимных параметров ФРТ в процессе регулирования фазового сдвига в нагрузочном режиме. Линиями показаны характеристики, полученные на основе математической модели, а "звездочками" - при структурно-имитационном моделировании.

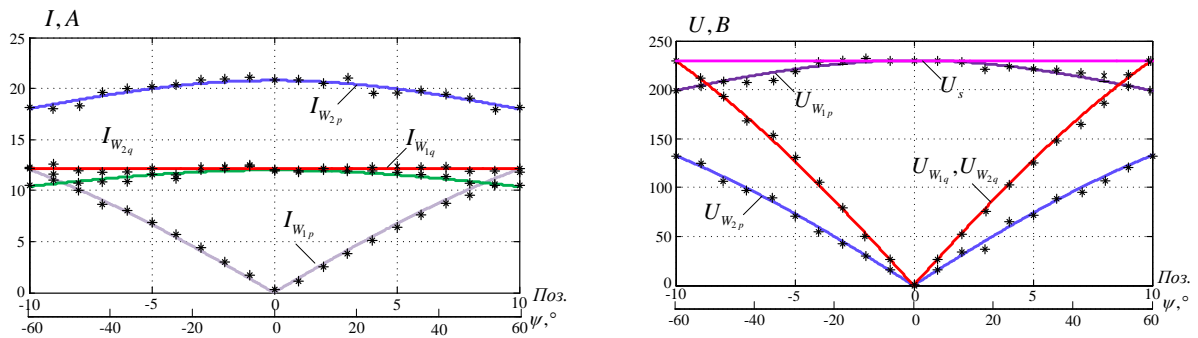


Рис.9. Графики токов и напряжений в элементах устройства, выполненного по схеме "звезда"

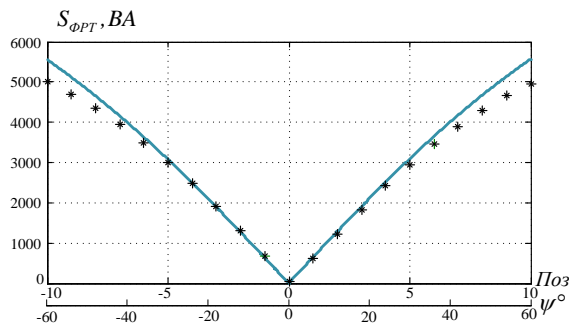


Рис.10. Характер изменения проходной мощности

Сравнительный анализ режимных характеристик объектов исследования полученных 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 предлагаемых далее схемных вариантов ФРТ.

В третьей главе "СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИЧЕСКИХ ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ" 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. Схема секционирования обмоток управления и законы переключения силовыми ключами на 7, 10, 12 и 15 ступеней регулирования представлены на рис.11-14 соответственно.

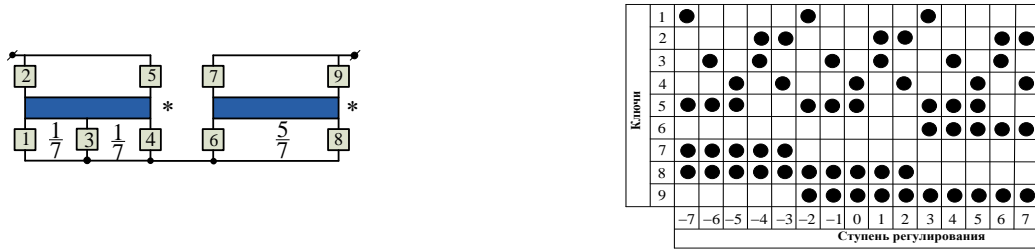


Рис.11. Обмотка управления и закон переключения на 7 ступеней регулирования

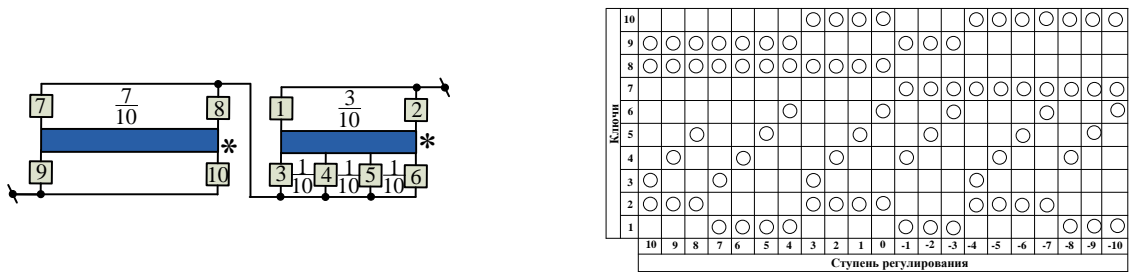


Рис.12. Обмотка управления и закон переключения на 10 ступеней регулирования

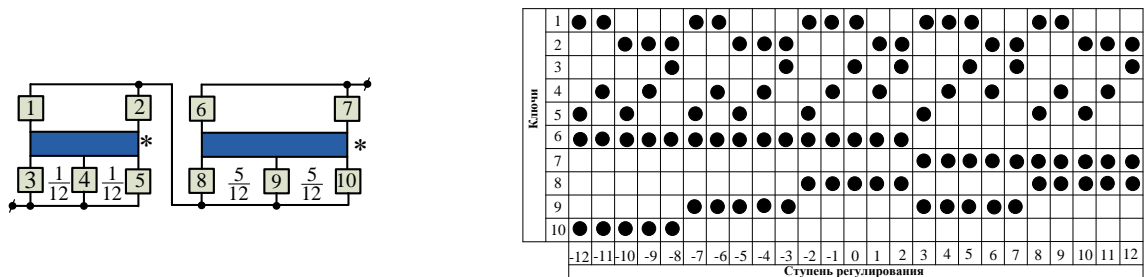


Рис.13. Обмотка управления и закон переключения на 12 ступеней регулирования

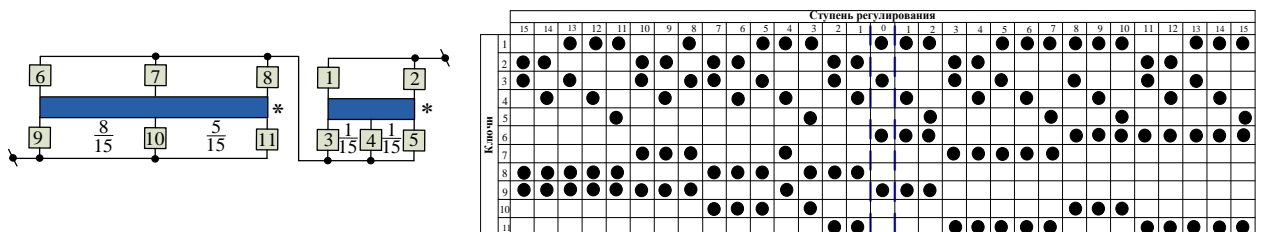


Рис.14. Обмотка управления и закон переключения на 15 ступеней регулирования

Разработаны и исследованы четыре оригинальных варианта ФРТ, принципиальные схемы, которых представлены на рис.15-18.

Для каждого варианта были применены различные стратегии и законы управления, обеспечивающие диапазон изменения угла фазового сдвига $\psi = 0 \div \pm 60^\circ$: "модифицированный треугольник" с управлением согласно рис.13; "инвертированный многоугольник" с управлением согласно рис.14; "модифицированный многоугольник" с управлением согласно рис.12; "в гексагональной конфигурации" с управлением согласно рис.11.

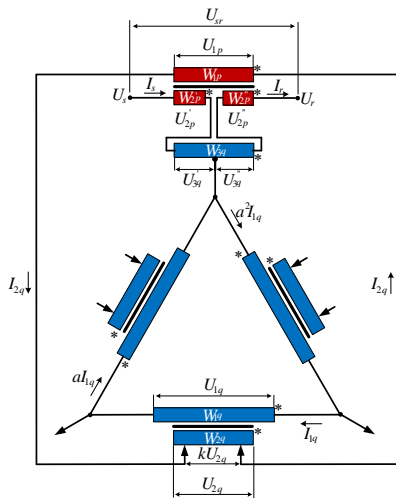


Рис.15. Схема ФРТ, выполненного по схеме "модифицированный треугольник"

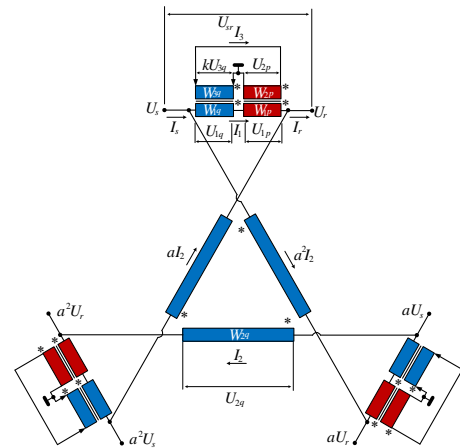


Рис.16. Схема ФРТ, выполненного по схеме "инвертированный многоугольник"

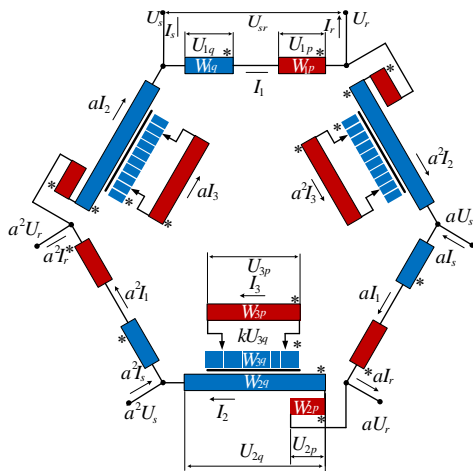


Рис.17. Схема ФРТ, выполненного по схеме "модифицированный многоугольник"

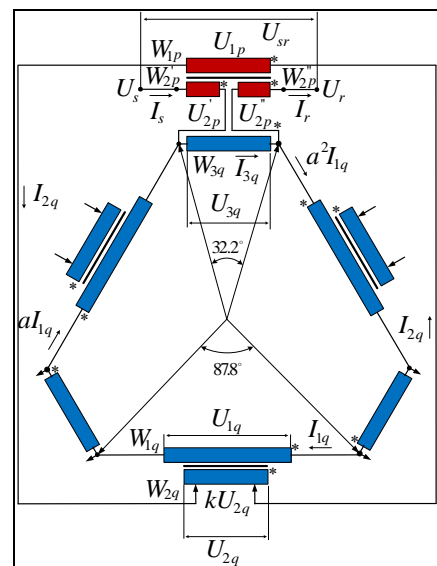


Рис.18. Схема ФРТ, выполненного в "гексагональной конфигурации"

Для каждой из рассмотренных схем были созданы SPS – модели, на основе которых выполнены расчетные эксперименты. Анализ полученных результатов позволил определить энергетические характеристики ФРТ, а также провести сравнительный анализ объектов исследования по выбранным критериям:

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

S_{PE}/S_r -коэффициент, характеризующий мощность средств управления.

Результаты сравнительного анализа представлены в виде диаграмм на рис.19.



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

Рис.19. Энергетические характеристики схемных вариантов ФРТ

В качестве одного из способов, направленных на снижение установленной мощности исследуемых устройств, было предложено использование конденсаторной батареи, включенной между входом и выходом ФРТ (технология УПКФРТ).

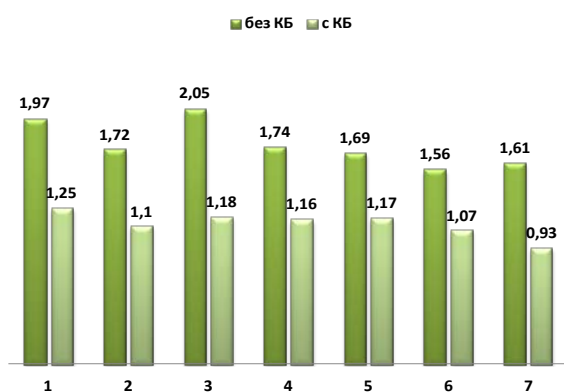


Рис.20. Установленная мощность ФРТ с использованием конденсаторной батареи

Результаты структурно-имитационного моделирования позволили определить оптимальные параметры конденсаторной батареи и показать эффективность предлагаемого способа (емкостной передачи части мощности) для существенного уменьшения типовой мощности ФРТ (рис.20).

Представленная на рис.19,20 информация позволила сделать вывод о том, что ФРТ (6,7) обладают наименьшими показателями по установленной мощности. Полученные результаты могут быть применены для сравнительного анализа схемных вариантов ФРТ, разрабатываемых в перспективе.

В четвертой главе "ПРИМЕНЕНИЕ ФРТ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТА КОМБИНИРОВАННЫХ FACTS" исследованы параметры режима электрической связи, содержащей преобразователь частоты, выполненный на основе ФРТ.

На рис.21 представлен схемный вариант одноканального преобразователя частоты на базе фазорегулирующего трансформатора.

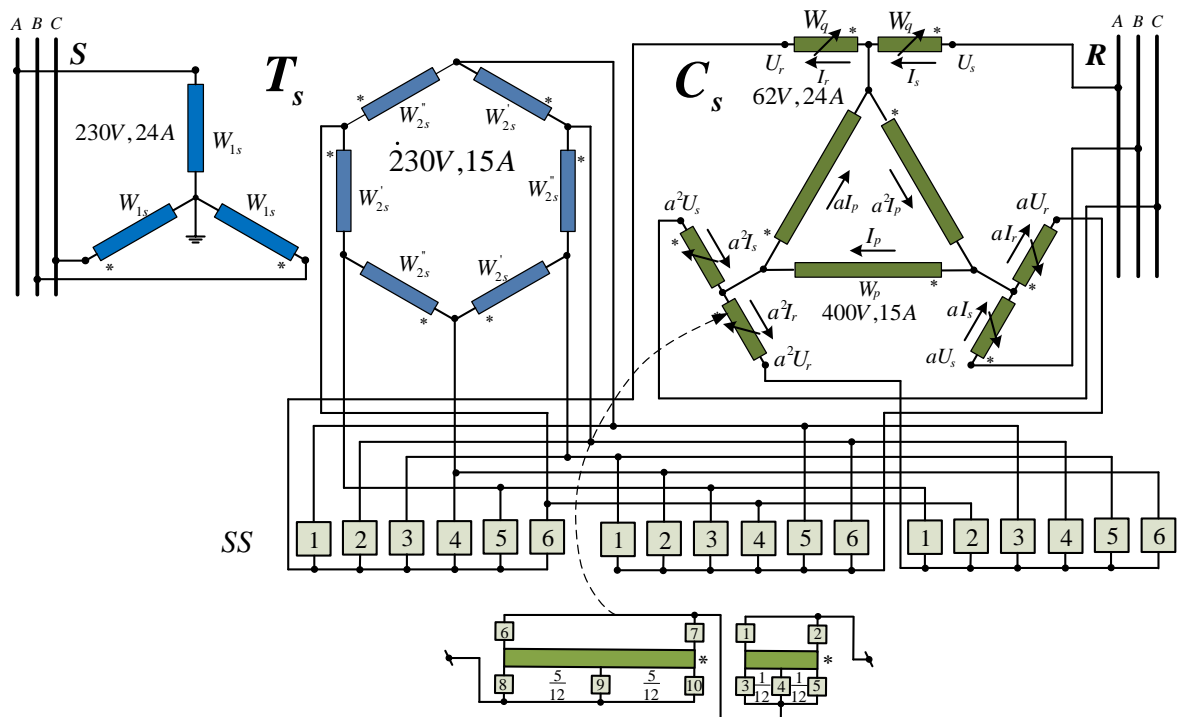


Рис.21. Схема одноканального преобразователя частоты

Основным элементом преобразователя, является фазорегулирующий трансформатор C_s , содержащий в каждой фазе соединенные в треугольник нерегулируемые рабочие обмотки и две одинаковые, последовательно соединенные обмотки управления, подключаемые средней точкой их соединения к вершинам треугольника. Обмотки управления секционированы и обеспечивают ступенчатое регулирование фазового сдвига на выходе блока тонкого регулирования. Плавность регулирования зависит от количества секций рабочей обмотки (для рассматриваемого устройства принято 12). Разработана стратегия регулирования (рис.22), обеспечивающая преобразование частоты с дискретностью $2,5^\circ$ и реверсированием обмотки управления.

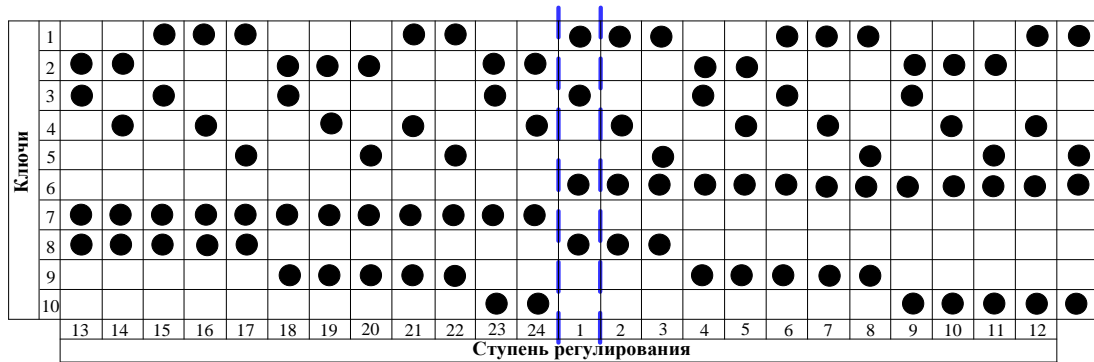


Рис.22. Стратегия управления преобразователем

Первичная обмотка силового трансформатора T_s подключена к питающей сети. Вторичная обмотка силового трансформатора T_s выполнена по схеме многоугольника, к вершинам которого подключен набор условных силовых электронных коммутаторов SS , которые образуют блок грубого регулирования преобразователя. Блок грубого регулирования обеспечивает разделение окружности преобразования на шесть секторов (по 60° в каждом), в пределах которых оперирует блок тонкого регулирования. Переключение секций рабочих обмоток обеспечивает ступенчатое изменение угла фазового сдвига напряжения на выходе по отношению к приложенному напряжению в пределах от 0 до 360 градусов. На основе структурно-имитационной модели были проведены расчетные эксперименты по схеме рис.23

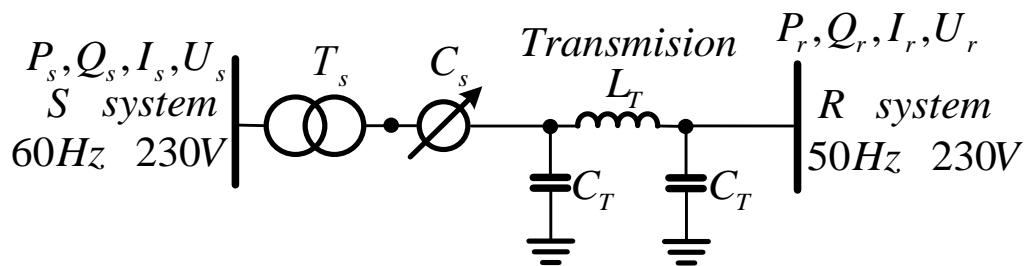


Рис.23. Схема проведения эксперимента при параллельной работе двух энергосистем через частотный преобразователь и ЛЭП

Для улучшения качества преобразования по частоте и повышения стабильности передаваемой мощности без применения специальных средств, предложен двухканальный вариант преобразователя (рис.24) с 30-и градусным фазовым сдвигом между каналами по напряжению, позволивший существенно уменьшить колебания активной мощности в передаче в процессе согласования частот.

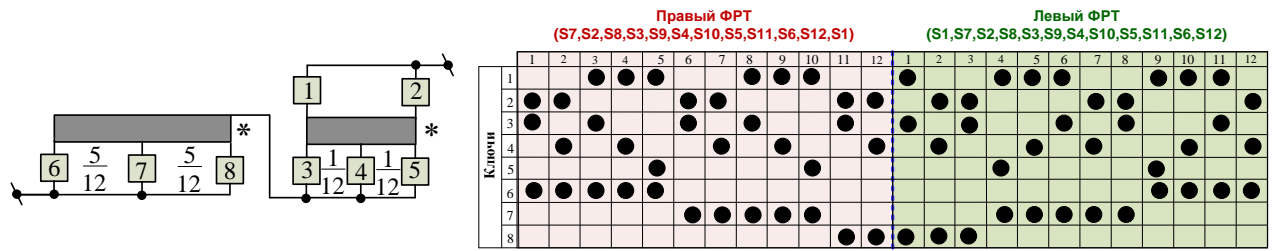


Рис.25. Обмотка и закон управления, обеспечивающие «безреверсную» стратегию управления

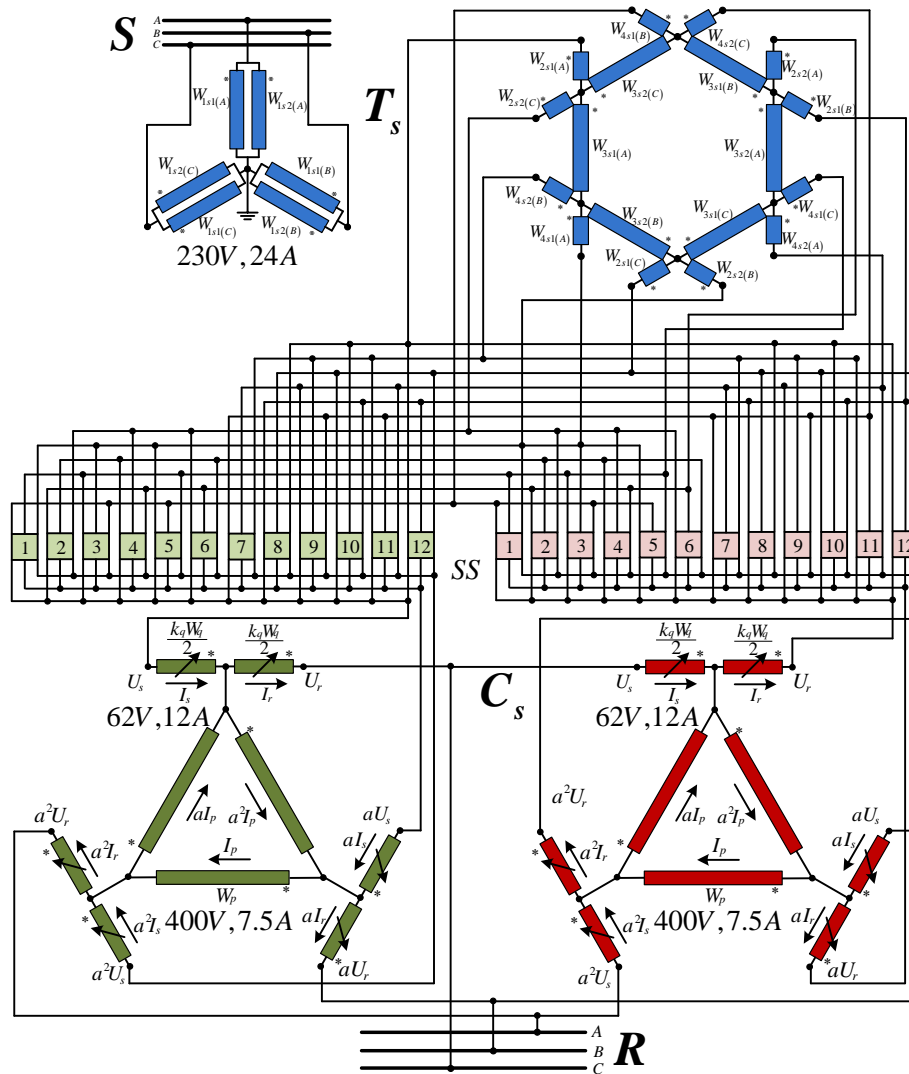


Рис.26. Схема двухканального преобразователя на базе «безреверсной» стратегии управления

- Для сравнения схемных вариантов преобразователей с точки зрения качества согласования по частоте и передачи мощности использованы следующие показатели:
- отклонение (девиация) передаваемой активной мощности на передающей $\partial P_s, \%$ и приемной $\partial P_r, \%$ системах от заданных значений;

коэффициент гармонических искажений тока на передающей $THD(I_s),\%$ и приемной $THD(I_r),\%$ системах. Результаты проведенных расчетных экспериментов показали неоспоримое преимущество "безреверсной" двухканальной схемы преобразователя (рис.27,28).

Проведены исследования для оценки влияния продольно включаемых дросселей на качество преобразования. Определены значения индуктивностей дросселей, находящиеся в диапазоне 0,03-0,035Гн, обеспечивающие наилучшие характеристики передачи. Доказана эффективность применения индуктивных элементов (дросселей) для улучшения качественных характеристик преобразования по мощности и частоте (рис.29,30).

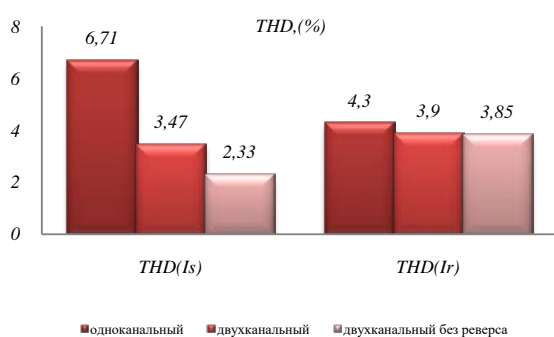


Рис.27. Коэффициент нелинейного искажения токов

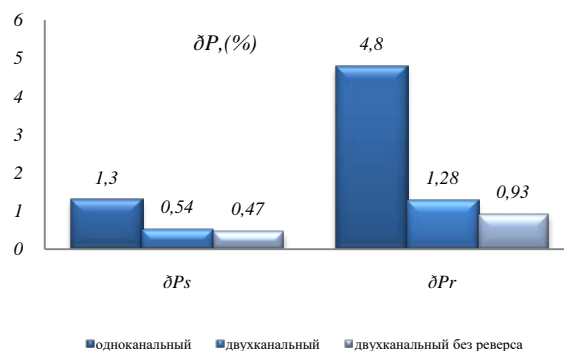


Рис.28. Отклонение передаваемой активной мощности

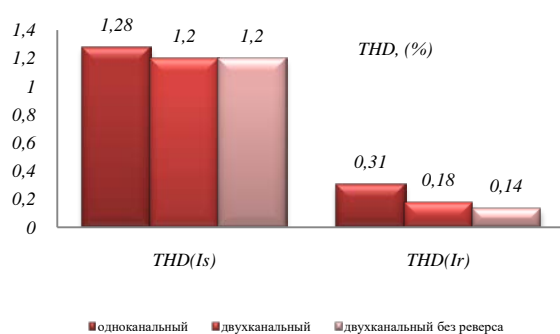


Рис.29. Коэффициент нелинейного искажения токов

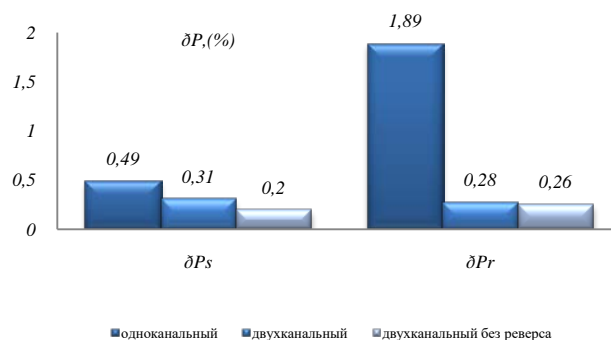


Рис.30. Отклонение передаваемой активной мощности

Предложен и исследован FACTS-контроллер управляемый ФРТ и выполняющий функции источника реактивной мощности, принципиальная схема, которого представлена на рис.31.

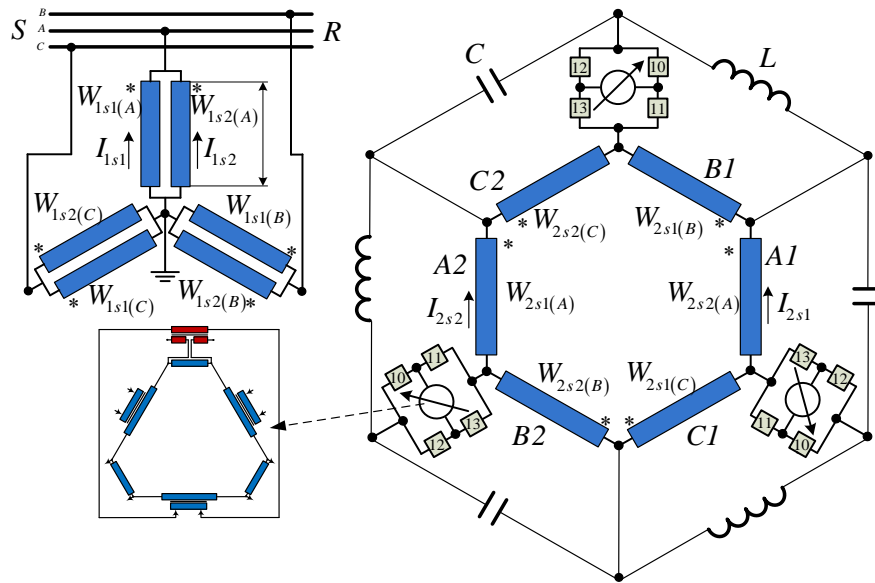


Рис.31. Схема управляемого источника реактивной мощности

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, подключенного пофазно к вершинам шестиугольника и возможностью реверсирования; сопряженных реактивных элементов L и C , имеющих равное сопротивление и присоединенных к устройству через реверсируемый ФРТ. Показано, что предлагаемое техническое решение обеспечивает симметричное регулирование выходного тока устройства, а также реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера в широком диапазоне в точке подключения устройства к сети (рис.32,33).

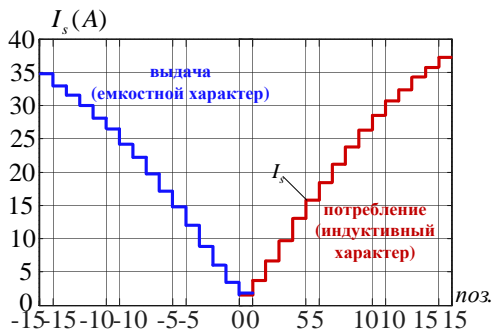


Рис.32. График изменения выходного тока устройства

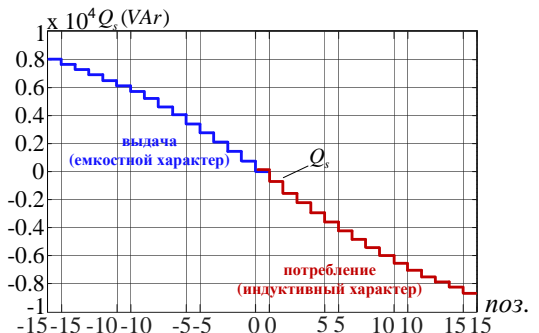


Рис.33. График выдачи и потребления реактивной мощности

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

В пятой главе "ЛАБОРАТОРНЫЙ ОБРАЗЕЦ ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА" для построения лабораторной физической модели выбран схемный вариант ФРТ с одним из наименьших показателей по установленной мощности, с применением технологии УПКФРТ. Создана структурно-имитационная модель устройства, на основе которой проведены расчетные эксперименты, позволившие уточнить характеристики лабораторного образца (Таблица 1).

Таблица 1. Характеристики лабораторного образца.

Трансформатор	последовательный (q)					параллельный (p)		
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}''
напряж. $U, В$	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

На основе данных таблицы 1 были изготовлены однофазные силовые модули устройства (рис.34,35).

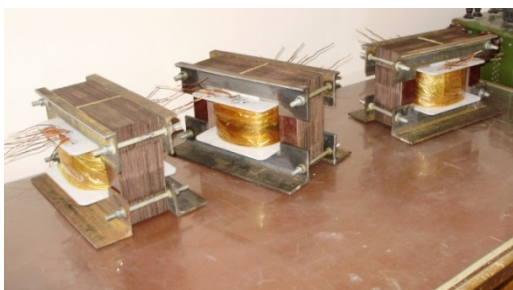


Рис.34. Возбуждающие элементы ФРТ

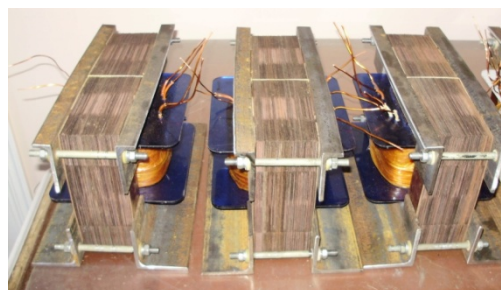


Рис.35. Последовательные элементы ФРТ

Тестирование однофазных силовых модулей в различных режимах показало идентичность их характеристик (рис.36,37) и позволило сделать вывод о возможности их применения в качестве составляющих элементов лабораторного образца.

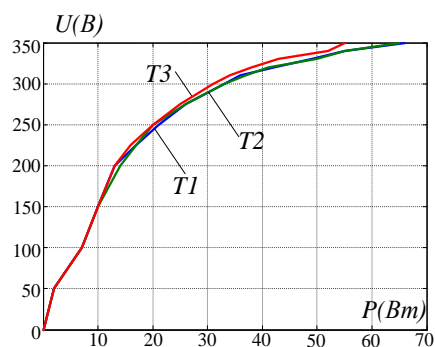
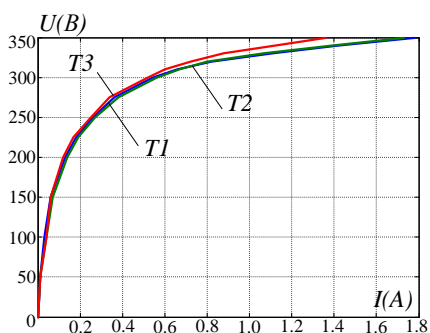


Рис.36. Графики тока и потерь в возбуждающих элементах в режиме холостого хода

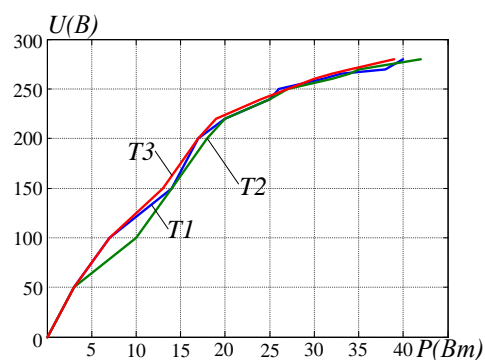
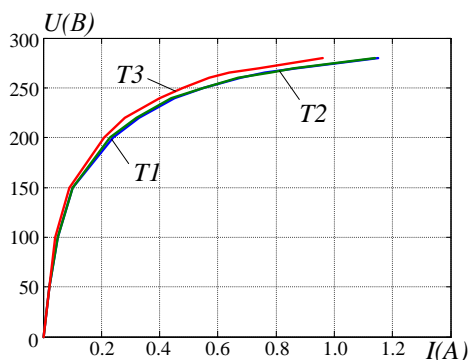


Рис.37. Графики тока и потерь в последовательных элементах в режиме холостого хода



Рис.38. Внешний вид электронного модуля



Рис.39. Общий вид лабораторного образца, номинальной мощностью 10 кВт

Разработана схема соединения силовых (рис.34,35) и электронного (рис.38) модулей, которая позволила собрать лабораторную модель в целом (рис.39).

В готовом виде лабораторная установка состоит из 4 модулей: 3 силовых однофазных модуля по 3,3кВт каждый и электронного модуля управления.

Лабораторный образец был протестирован на всем диапазоне регулирования угла фазового сдвига в характерных режимах. Результаты испытаний показали хорошее качество изготовления и корректность работы обмоток регулирования. Также был определен КПД изготовленного устройства (94%).

Сравнительный анализ режимных параметров показал их близость к характеристикам полученным при структурно-имитационном моделировании.

Для примера на рис.40 приведены зависимости задаваемого и фактического угла фазового сдвига от ступени регулирования. Можно констатировать, что разница между заданным и действительным углом сдвига фаз не превышает 2,97%.

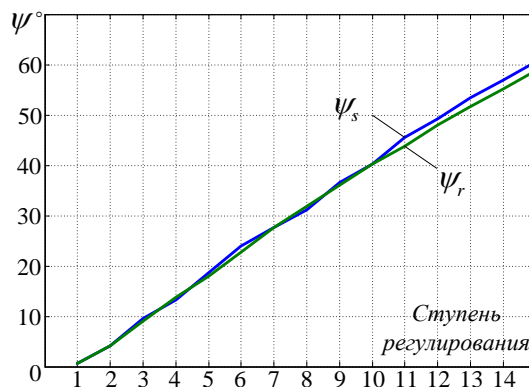


Рис.40 Зависимости расчетного и фактического значений углов фазового сдвига

Результаты испытаний физической модели доказали эффективность принятых технических решений (применение технологии УПКФРТ, усовершенствование схемы коммутации и закона управления), что привело к существенному уменьшению массогабаритных показателей ФРТ и оптимизации процесса регулирования.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Показана возможность применения ФРТ как одного из элементов для решения задач управления режимами современных активно-адаптивных сетей.
2. Исследована специфика ФРТ, способы регулирования угла фазового сдвига, типичные варианты схемного исполнения.
3. Проанализирован опыт применения ФРТ в мировой практике и показано, что разработка новых технических решений в этой области является актуальной.
4. Определен и обоснован методологический аппарат для исследования схемных вариантов ФРТ.
5. Предложена система секционирования обмоток управления и законы переключения силовыми ключами, для реализации требуемой стратегии управления.
6. Показана эффективность способа снижения установленной мощности ФРТ, основанного на емкостной передаче части мощности.
7. Определены наиболее технически привлекательные схемные варианты.
8. Подтверждена функциональность разработанных оригинальных FACTS контроллеров управляемых ФРТ. Предложены способы повышения эффективности их работы.
9. На основе гексагональной схемы ФРТ с использованием модульного принципа изготовлен лабораторный образец, испытания которого показали соответствие результатов, полученных при различных способах моделирования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Calinin Lev, Zaițev Dmitrii, Tîrșu 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 energiei regionale 1(27) 2015 pp.11-18. (THOMSON)
3. Голуб И. "Однотрансформаторное фазорегулирующее устройство для управления потоками мощности в электрических сетях". Problemele Energeticii Regionale 2 (31) 2016 Electroenergetică (THOMSON)
4. Голуб И., Зайцев Д., Зубарева И. Модифицированное двухтрансформаторное фазорегулирующее устройство, выполненное на основе классической однотрансформаторной схемы «Delta Connection». Problemele energiei regionale 1(30) 2016 pp.25-30. (THOMSON)
5. Голуб И., Зайцев Д., Тыршу М. Режимы источника реактивной мощности, управляемого фазорегулирующим трансформатором. Problemele Energeticii Regionale 2 (37) 2018 Electroenergetica, pp.62-69. (THOMSON)
6. 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. (THOMSON)
7. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. "Моделирование характеристик двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства". Problemele energiei regionale 1(24) 2014 стр.51-62.
8. Зайцев Д., Калинин Л., Тыршу М., Голуб И. Моделирование рабочих характеристик фазорегулирующего трансформатора. «Оперативное управление в энергетике» № 6/2015 с. 21-29
9. 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
10. 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.
11. 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, RM.

12. 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. (THOMSON)

13. Kalinin L., Zaitsev 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

14. 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.

15. 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.

16. Tirsu M.,Calinin L., Zaitsev 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

17. 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, RO. (SCOPUS)

18. 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)

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; 191 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.

ГОЛУБ ИРИНА

**ПРИМЕНЕНИЕ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ
УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

221.01 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Aprobat spre tipar: 21.06.21	Formatul hîrtiei 60x84 1/16
Hîrtie ofset. Tipar RISO.	Tiraj 20 ex.
Coli de tipar.: 2,0	Comanda nr. 51

UTM, 2004, Chişinău, bd. Ştefan cel Mare şi Sfânt, nr. 168,

Editura ”Tehnica-UTM”

MD-2045, Chişinău, str. Studenţilor, nr. 9/9.

© ТУМ, 2021