

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Școala doctorală „Știința Calculatoarelor, Electronică și Energetică”

Departamentul „Electroenergetică și Electrotehnică”

Cu titlu de manuscris
C.Z.U: 621.314.26(043)

CALOȘIN DANILA

**STUDIUL INTERCONEXIUNII FLEXIBILE DINTRE SIS-
TEMELE ENERGETICE IN BAZA TRANSFORMATOARELOR
CU CONVERSIE DE FRECVENȚĂ**

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.: 621.314.26(043)

КАЛОШИН ДАНИЛА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБКОЙ МЕЖСИСТЕМНОЙ СВЯЗИ НА
ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ЧАСТОТЫ**

Специальность: 221.01 „Энергетические системы и технологии”

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Кишинев 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ADNOTARE	5
ABSTRACT	6
АННОТАЦИЯ	7
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	8
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СРЕДСТВ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ С РАЗНЫМИ СТАНДАРТАМИ ЧАСТОТЫ	17
1.1 Вставки и передачи постоянного тока.....	17
1.2 Асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты	21
1.3 Вращающийся трансформатор с изменяемой частотой вращения.....	23
1.4 Исследование возможностей применения вращающегося трансформатора для связи энергосистем при скольжении по частоте больше 3 Гц.....	25
Вывод по первой главе	30
2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АППАРАТ ИССЛЕДОВАНИЯ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ УСТРОЙСТВ	31
2.1 Методология исследования	31
2.2 Математическая модель преобразователя частоты на основе источника неизменного тока.....	34
2.3 Математическое обоснование возможности реализации принципа кругового вращения фазы на основе статического трансформаторного устройства	44
Выводы по второй главе	49
3. СТАТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ИСТОЧНИКОВ НЕИЗМЕННОГО ТОКА.....	51
3.1 Разработка схемы преобразователя частоты на основе источников неизменного тока.....	51
3.2 Исследование характеристик устройства при асимметричном управлении ...	55
3.3 Анализ возможности улучшения качества преобразований на основе модернизированного варианта схемы устройства	62
Выводы по третьей главе	66
4. УПРАВЛЯЕМАЯ МЕЖСИСТЕМНАЯ СВЯЗЬ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЫПОЛНЕННОГО ПО СХЕМЕ «ЗИГЗАГ».....	68
4.1 Принципиальная схема и принцип работы устройства	68
4.2 Режимы двухканального преобразователя частоты выполненного по схеме «зигзаг»	75
4.3 Исследование характерных режимов работы межсистемной связи с преобразователем	83
Выводы по четвертой главе	88
5. УПРАВЛЯЕМАЯ МЕЖСИСТЕМНАЯ СВЯЗЬ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, ВЫПОЛНЕННОГО ПО СХЕМЕ «ШЕСТИУГОЛЬНИК»	90
5.1 Принципиальная схема и принцип работы устройства	90
5.2 Режимы работы многоканальных преобразователей.....	96
5.3 Исследование характерных режимов работы устройства при организации асинхронной управляемой межсистемной связи.....	100
Выводы по пятой главе	105
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ	106
БИБЛИОГРАФИЯ	108
Приложение А1. Паспортные данные и расчет параметров схемы замещения ..	121

Приложение А2. Результаты исследования вращающегося трансформатора в статическом режиме	124
Приложение А3. Результаты исследования вращающегося трансформатора в динамическом режиме	127
Приложение А4. Результаты исследования вращающегося трансформатора в динамическом режиме с последовательно включенным ИРС и компенсирующим устройством для поддержания уровня напряжения.....	129
Приложение А5. Таблицы результатов расчета динамических характеристик двухканального вращающегося трансформатора при синхронном изменении угла ψ_0	132
Приложение А6. Результаты расчета и имитационного моделирования статических характеристик преобразователя частоты на основе источников неизменного тока (ИРС).....	138
Приложение А7. Результаты расчетных экспериментов при имитационном моделировании работы преобразователя частоты по схеме «зигзаг»	147
Приложение А8. Результаты экспериментов при работе преобразователя частоты по схеме «шестиугольник»	160

ADNOTARE

Autor - Danila Caloșin. **Titlu** – Studiul interconexiunii flexibile dintre sistemele energetice în baza transformatoarelor cu conversie de frecvență. Teza privind oferirea titlului de doctor în științe tehnice, specialitatea 221.01. Sisteme și tehnologii energetice.

Structura lucrării: lucrarea constă dintr-o introducere, cinci capitole, concluzii și recomandări, o bibliografie de 137 de titluri și include 8 anexe, 169 de pagini, 108 figuri și 6 tabele. Rezultatele cercetării sunt publicate în 6 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: convertor electromotor de frecvență, legătură controlată asincron între sisteme Interphase Power Controller (IPC), conversie de frecvență, convertor de frecvență multi-modul, convertor static de frecvență pe baza de transformatoare.

Domeniu de cercetare - științe tehnice. **Scopul tezei** este realizarea cercetărilor teoretice și de calcul - experimentale ale LCS a curentului alternativ bazate pe convertoare statice de frecvență.

Obiectivele tezei sunt: dezvoltarea unor modele matematice a dispozitivelor bazate pe surse de curent constant și transformatoare statice cu transformare circulară a fazei tensiunii de ieșire; elaborarea schemelor electrice, precum și legilor controlului asupra regimurilor de lucru ale dispozitivelor cercetate; cercetarea dispozitivelor în stare statică și dinamică; determinarea fezabilității unor cercetări ulterioare în domeniul organizării LCS a curentului alternativ pe baza convertoarelor statice de frecvență.

Noutatea științifică a lucrării: constă în elaborarea modelelor matematice dispozitivelor bazate pe surse de curent constant și transformatoare statice cu transformare circulară a fazei tensiunii de ieșire; elaborate scheme electrice ale dispozitivelor bazate pe surse de curent constant și transformatoare statice cu transformare circulară a fazei tensiunii de ieșire realizate conform schemei „zig-zag” și „hexagon”; au fost elaborate legi de control ale regimurilor de lucru ale dispozitivelor cercetate pentru organizarea de LCS a curentului alternativ.

Problemă științifică rezolvată: în urma cercetărilor efectuate, este arătată posibilitatea rezolvării problemei științifice și tehnice privind organizarea LCS de curent alternativ pe baza instalațiilor propuse.

Semnificație teoretică. Cercetările efectuate pot servi drept bază pentru un studiu mai profund și mai detaliat al LCS de curent alternativ bazat pe convertoarele statice de frecvență.

Valoarea aplicată a lucrării: implementarea convertoarelor statice de frecvență va oferi posibilitatea elaborării și implementării LCS de curent alternativ mai ieftină și tehnic mai simplă decât interconexiunile de curent continuu.

Implementarea rezultatelor științifice: rezultatele cercetării pot fi utilizate în cercetări teoretice și experimentale, lucrări de proiectare și implementare a interconexiunilor de curent alternativ ce funcționează asincron.

ABSTRACT

The author – Danila Kaloshin. **The title** – *Study of Flexible Interconnecting Mains Based on Transformer Frequency Converters*. Dissertation for awarding the doctorate degree in technical sciences, speciality 221.01. *Power systems and technologies*.

Structure of the work: the dissertation includes introduction; five chapters; conclusions and recommendations; references, which contain 137 source and 107 appendices; 169 pages of the main text; 6 tables and 100 figures; 6 scientific works are published based on the research results.

Keywords: rotary frequency changer, asynchronous controlled intersystem connection, Interphase Power Controller (IPC), frequency transformation, multi-module frequency transformer, static transformer frequency converter.

Field of study - technical sciences. **Target of dissertation** consists of the persuasion of theoretic and calculation-experimental researches of the alternating current controlled interconnecting mains (AC CICM) based on the static transformer frequency converters.

Dissertation tasks: include the development of mathematical models of the facilities based on constant current sources and static transformers with a circular transformation of the output voltage phase; elaboration of the electric schemes, as well as the laws of control by the operating modes of the facility types under consideration; study of the facilities in the stages of static and dynamic states; determination of expedience of the future studies in the development of the AC CICM based on static transformer frequency converters.

Scientific novelty of the work: includes the mathematical models developed on the basis of the constant current sources and static transformers with a circular transformation of the output voltage phase; the electrical schemes of the facilities developed based on the constant current sources performed according to ‘zig-zag’ and ‘hexagon’ schemes; the laws of control by the operating modes of the facilities under study to organize the AC CICM.

Scientific problem solved: as the result of the study performed, the possibility is shown to solve the scientific and engineering problems of organization the AC CICM based on the proposed schematic variants of the facilities.

Theoretical importance. The research performed can serve as the basis for the deeper and more detailed study of the AC CICM using the static transformer frequency converters.

Application relevance of the work: realization of static frequency transformers will make it possible to ensure a simpler, from the viewpoint of organization, the AC CICM without the application of an intermediate link of the DC transformation.

Implementation of scientific results: the research results can be used in the process of theoretical and experimental studies, design and experimental works and technological engineering, as well as the development of the control devices and automated modes of operation for the devices of this kind.

АННОТАЦИЯ

Автор – Калошин Данила. **Название** – *Исследование гибкой межсистемной связи на основе трансформаторных преобразователей частоты*. Диссертация о присвоении докторской степени в области технических наук, специальность 221.01. *Энергетические системы и технологии*.

Структура работы: работа состоит из введения, пяти глав, выводов и рекомендаций, библиографии из 137 наименований и включает 8 приложений, 169 страниц, 100 рисунков и 6 таблиц. Результаты исследования опубликованы в 6 научных работах.

Ключевые слова: электромашинный преобразователь частоты, асинхронная управляемая межсистемная связь, Interphase Power Controller (IPC), преобразование частоты, многомодульный преобразователь частоты, статический трансформаторный преобразователь частоты.

Область исследования - технические науки. **Цель диссертации** состоит в проведении теоретических и расчетно – экспериментальных исследований УМС переменного тока на основе статических трансформаторных преобразователей частоты.

Задачи диссертации: заключаются в разработке математических моделей устройств на основе источников неизменного тока и статических трансформаторов с круговым преобразованием фазы выходного напряжения; разработке электрических схем, а так же законов управления режимами работы исследуемых типов устройств; исследовании устройств в статическом и динамическом состоянии; определении целесообразности проведения дальнейших исследований в области организации УМС переменного тока на основе статических трансформаторных преобразователей частоты.

Научная новизна работы: заключается в разработанных математических моделях устройств на основе источников неизменного тока и статических трансформаторов с круговым преобразованием фазы выходного напряжения; разработанных электрических схемах устройств на основе источников неизменного тока и статических трансформаторов с круговым преобразованием фазы выходного напряжения выполненных по схеме «зигзаг» и «шестиугольник»; разработанных законах управления режимами работы исследуемых устройств для организации УМС переменного тока.

Решенная научная проблема: в результате проведенного исследования показана возможность решения научно-технической проблемы организации УМС переменного тока на основе предложенных схемных вариантов устройств.

Теоретическая значимость. Проведенное исследование может послужить основой для более глубокого и детального исследования УМС переменного тока на основе статических трансформаторных преобразователей частоты.

Прикладное значение работы: реализация статических преобразователей частоты позволит обеспечить более простую с точки зрения организации УМС переменного тока без применения промежуточного звена преобразования на постоянном токе.

Внедрение научных результатов: результаты исследований могут быть использованы при проведении теоретических и экспериментальных исследований, опытно конструкторских работ и технологических разработок, а так же разработок устройств контроля и автоматизации режимов работы устройств такого типа.

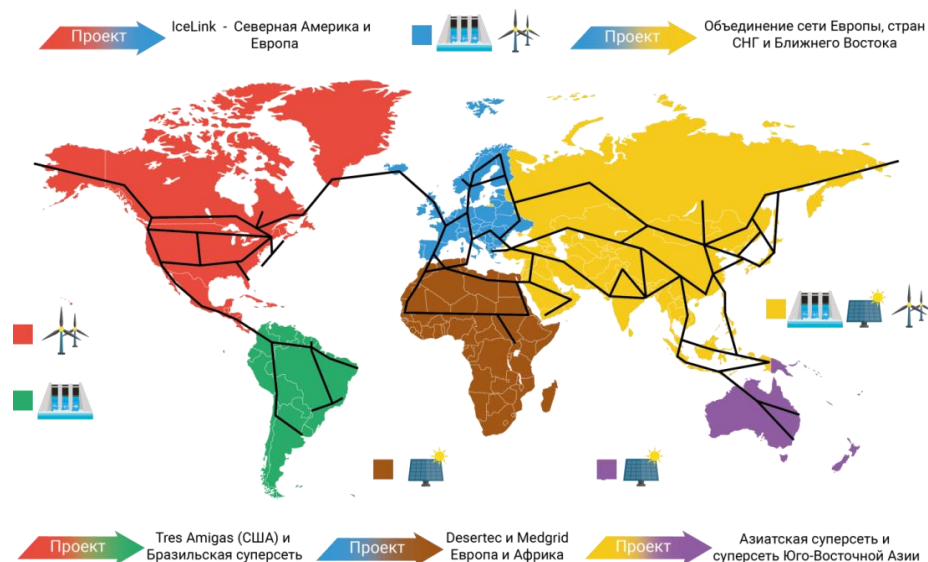
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- УМС – управляемая межсистемная связь
- ВПТ – вставка постоянного тока
- АС ЭМПЧ – Асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты
- ППТ – электропередача постоянного тока
- МГЭС – межгосударственная электрическая связь
- МГЭО – межгосударственное электрическое объединение
- VFT – Variable frequency transformer (Вращающийся трансформатор с изменяемой частотой вращения)
- IPC – Interphase Power Controllers (источник неизменного тока)
- FACTS – Flexible alternating current transmission systems (гибкие системы передачи переменного тока)
- SPS – SimPowerSystems (симулирование силовых систем)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Процесс интеграции электроэнергетических систем и формирование межгосударственных электрических связей (МГЭС) и объединений (МГЭО) является глобальной тенденцией, имеющей почти столетнюю историю. Сформированы, формируются и исследуются перспективы развития МГЭС и МГЭО в различных регионах мира [4,5,47,64].



На сегодняшний день в Европе уже функционирует единое МГЭО ENTSO-E, объединяющее более сорока сетевых и системных операторов из 36 европейских стран. Однако на этом электроэнергетическая интеграция в Европе не заканчивается. Намечается формирование Европейского объединения включающего в себя проекты Desertec и Medgrid, предназначенные для привлечения ресурсов солнечной энергии Северной Африки. Формирование Скандинавского и Североморского проекта объединения предназначенного для привлечения ветроэнергоресурсов Северного, Балтийского и Норвежского морей, а так же гидроэнергоресурсов Исландии позволит завершить формирование Европейского суперэнергообъединения [4,5,42,48].

Наряду с формированием МГЭС и МГЭО в энергосистемах возрастает величина возмущений, возникающих при аварийных режимах, вызванных отключением нагрузки, линий электропередач, источников энергии. Возникающие при этом переходные процессы в энергосистемах, не всегда могут быть эффективно ликвидированы из-за недостаточного управления основными элементами этих энергосистем в автоматическом или ручном режиме. Данные обстоятельства приводят к броскам мощности в межсистемных связях, что оказывает влияние на устойчивую работу связей или к возникновению крупных каскадных аварий в объединенных энергосистемах [7].

В то же время развитие энергосистем сопровождается ростом межсистемных связей разного класса напряжения, что приводит к шунтированию связей более низкого напряжения связями более высокого напряжения. При этом связи высокого напряжения могут быть недогруженными, а низкого напряжения более нагруженными, что влечет за собой невозможность оптимального распределения мощностей. К тому же отключение шунтирующих связей может приводить к потере устойчивой работы связи относительно низкого напряжения и как следствие ее отключение.

Существенно и то, что объединение крупных энергосистем приводит к росту токов короткого замыкания, впоследствии требующих применение комплекса мер по ограничению токов короткого замыкания в пределах энергосистемы.

Обобщая изложенное, следует сказать, что вопросы повышения управляемости электрических сетей за счет применения специальных технических средств в настоящее время являются актуальными. Одним из направлений комплексного решения перечисленных проблем является создание и внедрение в энергосистемах управляемых межсистемных связей [26].

Управляемая межсистемная связь - это связь, режимы работы которой могут быть заданы независимо от режимов работы связываемых электрических систем и управляться в автоматическом или ручном режиме по заданному закону.

Управляемая межсистемная связь (УМС) должна обеспечивать:

- ✓ свободное ведение режимов работы по частоте и напряжению в межсистемной связи;
- ✓ демпфировать возмущения в пределах одной части энергосистемы, по токам короткого замыкания;
- ✓ высокую надежность функционирования, так как УМС является узловым элементом энергосистемы;
- ✓ скорость изменения режима того же порядка, что и скорость переходных электромеханических процессов в связываемых энергосистемах.

УМС в полной мере должна удовлетворять условиям межгосударственного обмена мощностью, в том числе, и условиям стандартов по поддержанию качества электроэнергии.

Следует добавить, что применение УМС отражается в стратегиях развития энергетического комплекса различных стран мира [19].

Примером этого может служить энергетическая стратегия Республики Молдова до 2030 года [30], в соответствии с которой предусматриваются мероприятия по объедине-

нию молдавской и румынской электроэнергетических систем, за счет организации асинхронного подключения Республики Молдова к полному участку Молдова-Румыния синхронно с ENTSO-E. Запланированная стратегическая цель достигается путем установки вставок постоянного тока back-to-back в Республике Молдова для воздушных линий Вулкэнешть-Исакча 400 кВ, Бэлць-Сучава 400 кВ, Стрэшень-Яссы 400кВ, так как данные устройства удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к УМС, и находят применение в энергосистемах разных стран мира. Ключевые проблемы передачи постоянным током детально изучены на практике и успешно преодолеваются, однако многие конструктивные решения пока остаются дорогостоящими [12,30,134].

Альтернативой передачам и вставкам постоянного тока выступают вращающийся трансформатор с изменяемой частотой вращения (VFT) компании «General Electric» (США) и асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты (Россия) [52,53,27,29]. Представленные устройства выгодно отличаются от передач и вставок постоянного тока низким содержанием высших гармоник, возможностью их использования в качестве источника реактивной мощности. Однако вынужденное применение трущихся токосъемных контактов, сложность обслуживания, низкая маневренность, достаточно высокая стоимость оборудования, ограниченный диапазон по частоте скольжения связываемых систем и проблемы, связанные с построением агрегатов большой мощности ограничивают область применения установок данного типа.

Таким образом, представляется актуальным разработка предлагаемых статических трансформаторных преобразователей частоты для организации УМС переменного тока, обладающих преимуществами по отношению к существующим типам преобразователей. К таким преимуществам следует отнести отсутствие преобразовательной техники, гармонических фильтров и демпферов, больших вращающихся масс, трущихся токосъемных контактов, ограничений в части установленной мощности устройства.

Разработка новых видов устройств представляет собой достаточно сложную научно – техническую задачу, решение которой требует выполнения большого комплекса теоретических и экспериментальных исследований, опытно конструкторских работ и технологических разработок, а так же создание средств контроля и автоматизации режимов работы.

Цели и задачи исследования: Целью работы является проведение теоретических и расчетно – экспериментальных исследований УМС переменного тока на основе статических трансформаторных преобразователей частоты.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. разработка математических моделей устройств на основе источников неизменного тока и статических трансформаторов с круговым преобразованием фазы выходного напряжения;
2. разработка новых схемных вариантов устройств на основе источников неизменного тока и статических трансформаторов с круговым преобразованием фазы выходного напряжения;
3. разработка структурно – имитационных моделей и законов управления режимами работы устройств на основе источников неизменного тока и статических трансформаторов с круговым преобразованием фазы выходного напряжения;
4. исследование устройств, в статическом и динамическом состоянии;
5. исследование характерных режимов работы преобразователей при организации УМС переменного тока;
6. обоснование целесообразности проведения дальнейших исследований в области организации УМС переменного тока на основе статических трансформаторных преобразователей частоты.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель статического преобразователя частоты на основе источников неизменного тока, позволяющая определить область существования режимов передачи мощности, а так же статические характеристики отдельных элементов;
2. Разработана математическая модель статического трансформаторного преобразователя частоты, подтверждающая возможность применения такого устройства в качестве преобразователя частоты;
3. Разработаны электрические схемы статического преобразователя на основе источников неизменного тока и статических трансформаторных преобразователей частоты, выполненных по схеме «зигзаг» и «шестиугольник»;
4. Разработаны законы управления режимами работы устройств на основе источников неизменного тока и статических трансформаторов с круговым преобразованием фазы выходного напряжения для организации УМС переменного тока.

Теоретическая и практическая ценность результатов работы заключается в следующем:

1. Разработанная математическая модель статического преобразователя частоты, позволяющая проиллюстрировать полную картину режимов работы, а так же характеристики отдельных элементов преобразователя, может найти применение для проведения теоретических и экспериментальных исследований устройств подобного типа в статических режимах работы;
2. Результаты, полученные при исследовании статических трансформаторных преобразователей частоты, могут послужить основой для более глубокого и детального исследования УМС переменного тока в части оптимизации схемных решений и законов управления устройствами подобного типа.

Методология и методы исследования:

В процессе проведения исследования для решения поставленных задач применялись общенаучные методы, включающие в себя общелогические приемы, метод систематизации научных знаний, методы математического и имитационного моделирования.

В качестве основополагающих методов исследования применялось математическое и имитационное моделирование объектов исследования. При имитационном моделировании исследуемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с которой проводятся вычислительные эксперименты с целью получения информации об этой системе. В качестве инструмента имитационного моделирования объектов выступает среда динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем, реализующая двухступенчатый подход к решению задач электроэнергетики, а так же алгоритмы интегрирования с переменным шагом, позволяющие выполнять высокоточное моделирование реальных элементов электроэнергетических систем.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Математические модели преобразователей на основе источников неизменного тока и статических трансформаторов с круговым преобразованием фазы выходного напряжения;
2. Законы управления статическими преобразователями частоты на основе источников неизменного тока;
3. Стратегии управления статическими преобразователями частоты на основе статических трансформаторов с круговым преобразованием фазы выходного напряжения для обеспечения процесса согласования по частоте параллельно работающих энергосистем с разными стандартами частоты;

4. Схемные варианты исследуемых преобразователей частоты для организации УМС переменного тока;
5. Способы улучшения качества преобразования при организации УМС переменного тока;
6. Обоснование целесообразности применения статических преобразователей частоты в качестве устройств для УМС переменного тока.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью выполненных расчетов посредством математического описания и структурно – имитационного моделирования в среде динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Заседаниях и научно-технических семинарах Института Энергетики Молдовы.
2. 7 Международной конференции современных энергетических систем, MPS 2017 Клуж-Напока, 06-09 июня 2017 г.
3. 10 Международной конференции «Математического моделирования в образовании, науке и производстве», Тирасполь, 28-30 сентября 2017 г.
4. 8 Международной конференции по энергетике и окружающей среде, CIEM 2017 Бухарест, 19-20 октября 2017 г.
5. FOREN 2020 год.

По теме диссертации опубликовано 5 статей и представлены 3 доклада на 3 международных конференциях.

По теме диссертации опубликовано 6 статей и представлены 3 доклада на 3 международных конференциях.

Структура и объём диссертации

Диссертация изложена на 169 страницах машинописного текста и состоит из пяти глав, общих выводов и заключения, 8 приложений. Библиографический список использованной литературы включает 137 источников, в том числе 107 иностранных. Работа содержит 6 таблиц и 100 рисунков.

Во Введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследо-

вания, определены методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о степени достоверности и апробации результатов.

В первой главе сделан обзор существующих средств объединения энергосистем.

В настоящее время для решения вопроса организации УМС применяются ВПТ и ППТ, как наиболее исследованные и нашедшие применение в энергосистемах разных стран мира. За последние шестьдесят лет в мире было выполнено более 200 проектов по организации УМС на постоянном токе.

Рассмотрен опытно – промышленный образец АС ЭМПЧ (Россия) и один из промышленных образцов VFT (США), установленный на подстанции «Langlois» между сетями «New York-Ontario» (США) и «Hydro-Quebec» (Канада). Данные устройства позволяют выполнить УМС на переменном токе между синхронно работающими системами с разными стандартами по поддержанию частоты. Так же исследован вопрос применения вращающегося трансформатора для связи энергосистем, скольжение по частоте которых составляет $\pm 10 Гц$. Результаты исследований показали принципиальную возможность построения УМС переменного тока при более широком диапазоне изменения частоты скольжения.

Во второй главе представлены математическое описание принципа работы устройства на основе источников неизменного тока и математическое обоснование реализации принципа кругового вращения фазы на основе статического трансформаторного устройства. Представлены применяемые в работе основные общенаучные методы, а так же метод имитационного моделирования, позволяющие решить поставленные задачи и достичь цели диссертационного исследования. В качестве метода имитационного моделирования выступает среда динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем, способная реализовать математическое описание принципов работы устройств в виде имитационных моделей с достаточно высокой точностью процесса моделирования.

В третьей главе разработан и на основе имитационной модели исследован статический преобразователь частоты на основе источников неизменного тока в статических и динамических режимах работы. Проведено сопоставление результатов, полученных на имитационной модели в статических состояниях с данными математической модели устройства, показавшие, что математическая модель в равной степени иллюстрирует режимные характеристики устройства и его элементов. Предложены способы симметричного и асимметричного управления устройством и возможности усовершенствования схемы с целью снижения сопровождающей реактивной мощности при выполнении коммутаций в процессе работы пре-

образователя. Выполнен анализ возможности улучшения качества преобразования на основе модернизированного варианта схемы устройства. Показано, что модернизированный вариант преобразователя обеспечить синхронную УМС переменного тока двух синхронно работающих систем с разными стандартами по поддержанию частоты.

В четвертой главе разработан и на основе имитационной модели исследован статический преобразователь частоты по схеме «зигзаг». Разработан закон «грубого» управления устройством, а так же два варианта позиционного секционирования для блока «тонкого» управления. Результаты динамического режима работы предложенного схемного варианта устройства на нагрузку и приемную систему через линию при двух вариантах позиционного секционирования и разных соотношениях частот и мощностей передающей и приемной систем свидетельствуют об эффективности применения устройства при подключении к энергосистеме небольших источников с нестабильной рабочей частотой. Выполнен анализ характерных режимов работы межсистемной связи при работе устройства, который показал эффективность и хорошую реакцию преобразователя частоты на исследуемые типы возмущений.

В пятой главе разработана и исследована электрическая схема статического преобразователя частоты по схеме «шестиугольник» позволяющая обеспечить УМС переменного тока. Разработан закон «грубого» и «тонкого» управления устройством. Разработана многоканальная технология использования устройства на основе согласующих трансформаторов. Результаты динамического режима работы при двух вариантах позиционного секционирования и различном количестве одновременно находящихся в работе каналов, а так же характерные режимы работы устройства при организации УМС переменного тока. Исследования показали, что предложенное устройство обеспечивает УМС переменного тока двух асинхронно работающих систем ($\pm 10 Гц$), а применённый принцип многоканальности позволит повысить надежность УМС переменного тока.

Общие выводы и рекомендации отражают полученные научные и теоретические результаты работы, а так же определяют целесообразность проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в области организации асинхронной УМС переменного тока на основе статических трансформаторных преобразователей частоты.

Используемое программное обеспечение: текстовый редактор Microsoft Word 2010, электронные таблицы Microsoft Excel 2010, система управления базами данных Microsoft Access 2010, векторный графический редактор Microsoft Visio 2010, программа подготовки и просмотра презентаций Microsoft Power Point 2010, среда динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем Matlab Simulink 2015.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СРЕДСТВ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ С РАЗНЫМИ СТАНДАРТАМИ ЧАСТОТЫ

1.1 Вставки и передачи постоянного тока

Для решения задач электроэнергетики в сфере организации УМС в настоящее время в энергосистемах применяются вставки постоянного тока, выполненные на основе силовой полупроводниковой техники, направленные на управление потоков мощности в энергосистеме и их использование расширяется в значительной степени благодаря развитию науки в области силовой электроники [28,42,68].

Существующие виды УМС на постоянном токе подразделяются на две группы. К первой группе относится электропередача постоянного тока (ППТ), в устройствах такого типа электрическая энергия передается на какое-то расстояние и неотъемлемой частью данных устройств является воздушная или кабельная линия постоянного тока. Ко второй группе относятся вставки постоянного тока (ВПТ), в устройствах такого типа линия постоянного тока отсутствует [80,95].

Устройства, выполненные на основе силовой полупроводниковой техники, такие как ППТ и ВПТ находят широкое применение в энергосистемах различных стран мира (рис.1) [31,67,108,112,116,125].

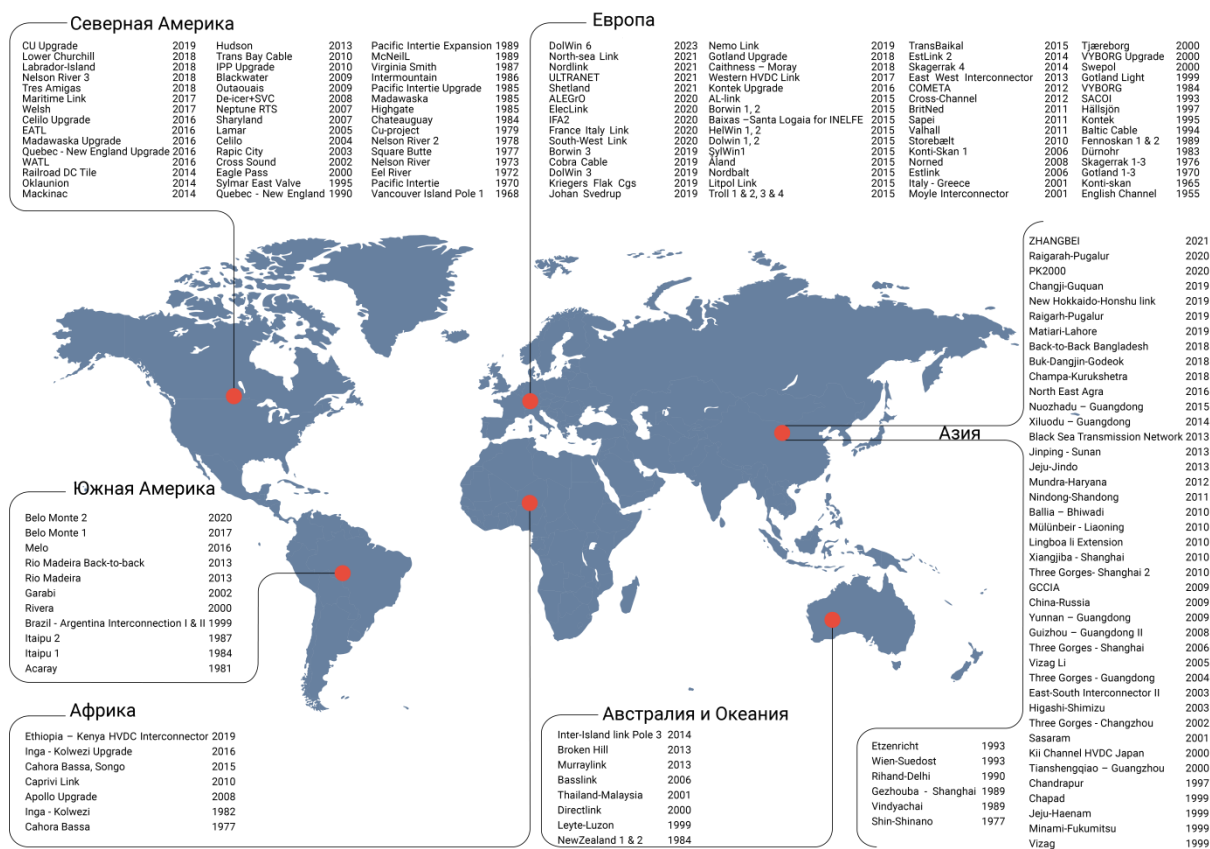


Рис. 1.1 Применение ВПТ и ППТ в энергосистемах различных стран мира

Так, например, в Европе за последнее время введены в эксплуатацию такие линии передач, как: Финляндия – Швеция («AL – link», КЛ, 100 МВт, 2015), Норвегия – Дания («Skagerrak – 4», ВКЛ, 700 МВт, 2014), Польша – Литва («LitPol Link», ВЛ, 500 МВт, 2015), Литва – Швеция («NordBalt», КЛ, 700 МВт, 2015), Великобритания – Бельгия («Nemo», КЛ, 1000 МВт, 2019) [31,83].

С целью привлечения гидро- и ветроэнергоресурсов Северного, Балтийского и Норвежского морей выполнены или находятся в процессе завершения следующие проекты:

- North Sea Link - подводный силовой кабель HVDC мощностью 1400 МВт и длиной 730 км для объединения энергорынков Норвегии и Великобритании с целью снижения стоимости электроэнергии за счет ВИЭ. Проект планируется завершить в 2021 году [111];

- Nord Link - подводный силовой кабель HVDC, проложенный между Норвегией и Германией. Кабель длиной более 500 километров и мощностью 1400 МВт. Проект направлен на объединение энергорынков указанных государств, с целью снижения стоимости электроэнергии за счет ВИЭ. Завершение проекта планируется на март 2021 года. Пробный пуск линии связи запланирован на декабрь 2020 года [31];

- IFA-2 (Interconnexion France-Angleterre 2) – второй подводный силовой кабель HVDC строящийся между Францией и Великобританией длиной 204 км и мощностью 1000 МВт. Проект направлен на увеличение пропускной способности МГЭС между Великобританией и странами континентальной Европой, в том числе для обеспечения возможности интеграции ВИЭ в энергосистему Великобритании. Линию связи планируется ввести в эксплуатацию в 2020 году [109];

- Kriegers Flak – проект направлен на создание первого в мире объединения асинхронных энергосистем восточной Дании и Германии посредством ВПТ, мощность которого составит 400 МВт, с включением в связь трех шельфовых ветропарков: строящейся датский ветропарк Kriegers Flak и два существующих немецких ветропарка Baltic 1 и Baltic 2. Проект введен в эксплуатацию в 2019 году [31];

- Cobra Cable - подводный силовой кабель HVDC мощностью 700 МВт и длиной 325 км для объединения энергорынков Дании и Нидерландов с целью компенсации суточных и сезонных колебаний генерируемых мощностей, увеличение надежности энергоснабжения. Линия связи введена в эксплуатацию в 2019 году [31].

Следует отметить, что за последнее время в энергосистемах государств расположенных на других континентах так же выполняется реализация проектов строительства ВПТ и ППТ.

В Северной и Южной Америке действует целый ряд мощных электропередач постоянного тока:

- Канада, проект Nelson River, Bipole III – воздушная линия постоянного тока длиной 1400 км и мощностью 2000 МВт. Проект предназначен для передачи мощности от ветроэлектрических станций, расположенных на севере Манитобы к центрам нагрузки около Виннипега. Линия была построена по заданному маршруту и введена в эксплуатацию в 2018 году [31,67];

- Канада, проект Maritime Link – это подключение постоянного тока высокого напряжения (HVDC) мощностью 500 МВт, которое позволит передавать электроэнергию от ветроэнергетических станций, вырабатываемую в Ньюфаундленде и Лабрадоре, в североамериканскую сеть в Новой Шотландии. Линия связи введена в эксплуатацию в 2017 году [31];

- США, проект Juan de Fuca Cable – планируемая связь между островом Ванкувер в Канаде и штатом Вашингтон США. Планируемая длина линии связи 31 км и мощность 550 МВт [31];

- США, проект Railroad DC Tile – линия электропередачи постоянного тока протяженностью 560 км, мощностью 2100 МВт. Проект направлен на объединение электрических сетей штатов Айова и Иллинойс. Связь введена в эксплуатацию в 2014 году [31];

- Бразилия, проект Rio Madeira – связь постоянного тока длиной 2375 км и мощностью 7300 МВт. Проект направлен на объединение электрических сетей штатов Рондония и Сан-Паулу и экспорта электроэнергии новых гидроэлектростанций, построенных на реке Мадейра, в центральную и юго – восточную часть Бразилии. Проект был завершен в 2013 году [115];

Вместе с тем, несколько мощных и протяженных ППТ имеются в Африке и Азии:

- Африка, проект Ethiopia – Kenya HVDC Interconnector – воздушная линия постоянного тока длиной 1045 км и мощностью 2000 МВт. Проект позволит уменьшить стоимость электроэнергии для потребителей и содействовать устойчивой выработке ВИЭ. Трансграничное соединение Эфиопия – Кения станет первым HVDC соединением в Восточной Африке, а для Эфиопии – основным каналом экспорта электроэнергии. Проект

межгосударственного электрического соединения Эфиопия – Кения планируется завершить в сентябре 2020 году [22];

- Китай, проект Changji – Guquan – является первой в мире линией электропередачи, работающей на напряжение 1100 кВ, длиной 3284 км и передаваемой мощностью 12000 МВт. Строительство было начато в январе 2016 года и завершено в декабре 2018 года [107];

- Индия – Бангладеш, проект Bangladesh, Block II – ВПТ для организации УМС асинхронно работающих систем мощностью 500 МВт. Проект завершен в 2018 [28];

- Индия, Raigarh – Pugalur (IRP800) – ВЛ постоянного тока длиной 1830 км, мощностью 6000 МВт. Проект планируется завершить к декабрю 2020 года [113,114];

Подводя итог, следует сказать, что передачи и вставки постоянного тока позволяют создавать УМС и способны:

- создать благоприятные условия функционирования оптовых рынков электроэнергии и мощности;
- объединять энергосистемы переменного тока с частотой 50 и 60 Гц или работающих синхронно с разными стандартами по поддержанию частоты;
- изменять величину и направление потока мощности, осуществляя передачу электроэнергии по заданному режиму;
- обеспечить минимально низкую пропускную способность межсистемных связей, исключив тем самым проблему слабых связей;
- существенно облегчить интегрирование возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) с энергосистемой.
- увеличить эффективность управления энергообъединений большой мощности и протяженности.

Несмотря на большой спектр преимуществ, данным устройствам присущи следующие недостатки:

- высокая стоимость преобразовательных подстанций, необходимых для присоединения к электрическим сетям переменного тока;
- сложности при решении задач проектирования и эксплуатации систем многоконцевых передач постоянного тока, в отличие от систем переменного тока;
- управление перетоками мощности в сетях постоянного тока выполняется системой управления, а не благодаря внутренним свойствам ЛЭП;

- ухудшение коэффициента гармонических искажений тока и напряжения преобразовательными подстанциями, что влечет за собой снижение качества электрической энергии. Поэтому возникает необходимость установки фильтров высших гармоник, а так же компенсации реактивной мощности преобразователей при инвертировании постоянного тока в переменный;

- влияние на передачу постоянного тока близких коротких замыканий в сети переменного тока;

- трудности при заземлении линий постоянного тока, связанные с установкой сложного оборудования для обеспечения правильной работы и исключения возможности возникновения «шагового напряжения»;

- возникновение электрической коррозии металлических конструкций, в основном трубопроводов, проложенных в земле, при протекании постоянного тока через землю в однополюсной системе.

1.2 Асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты

Исследование и разработка электромеханической вставки переменного тока для организации УМС двух асинхронных систем на основе асинхронизированного синхронного электромеханического преобразователя частоты (АС ЭМПЧ) [10] ведется с 70-х годов прошлого столетия. Данное устройство было запатентовано в 1994 году.

АС ЭМПЧ представляет собой агрегат из двух машин переменного тока одинаковой мощности с жестко соединенными валами, одна из которых выполнена как асинхронизированная синхронная машина (АСМ), а другая — как АСМ (АС ЭМПЧ типа АСМ+АСМ) или как синхронная машина (АС ЭМПЧ типа АСМ+СМ). Последний вариант конструктивно проще, но синхронная машина подключается к энергосистеме с более жесткими требованиями к качеству электроэнергии. Первая по направлению передачи мощности через АС ЭМПЧ машина работает в режиме двигателя, вторая — в режиме генератора [23].

АС ЭМПЧ обеспечивает управление величиной и направлением передаваемой активной мощности в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах, вплоть до реверса, при синхронной и асинхронной работе или с разными стандартами по поддержанию частоты частей энергосистем. Так, для АС ЭМПЧ, состоящего из двух асинхронизированных машин с номинальной мощностью 2×200 МВт, время полного реверса, от +200 МВт до -200 МВт, составляет 0,24 сек, при этом поддерживается допустимый уровень напряжения. Так, например, каждая из машин АС ЭМПЧ способна в пределах, ограничен-

ных номинальными токами, генерировать реактивную мощность или обеспечить без потери устойчивости ее потребление. Кроме того АС ЭМПЧ позволяет демпфировать колебания возникающие при аварийных режимах работы энергосистем, существенно уменьшая возмущения, передаваемые из одной части энергосистемы в другую. Так, при коротком замыкании или АПВ в одной из энергосистем, агрегат будет разгоняться или тормозиться при этом величина передаваемой активной мощности АСМ, подключенной к другой энергосистеме, будет оставаться неизменной при соответствующем управлении [7].

В ВНИИ «Электромаш» и «Электротяжмаш» (г. Харьков) [2,3] были выполнены эскизные и технические проекты АСМ, для АС ЭМПЧ, вертикального (гидрогенераторного) и горизонтального (турбогенераторного) исполнения мощностью от 100 до 500 МВт.

Заводом и НИИ «Электротяжмаш» была разработана и создана серия из трех опытно-промышленных образцов АС ЭМПЧ-1 состоящих из двух АСМ мощностью 1 МВт. Данные образцы были всесторонне испытаны. У преобразователя из двух АСМ четыре степени свободы, то есть одновременно и независимо могут регулироваться четыре параметра режима агрегата. Однако, как показали теоретические и экспериментальные исследования, на АС ЭМПЧ типа АСМ+СМ реализуемы все режимы, возможные на АС ЭМПЧ типа АСМ+АСМ, в том числе и режимы потребления реактивной мощности со стороны обеих машин. Допустимая разность частот объединяемых энергосистем, а также управляемость АС ЭМПЧ определяются «потолочной» величиной напряжения возбуждения машин. Так, для АС ЭМПЧ типа АСМ+АСМ мощностью 200 МВт по проекту ОАО «Электросила» г. Санкт-Петербург допустимая разность частот двух объединяемых асинхронно работающих энергосистем составляет $\pm 4 \text{ Гц}$, а при режимах $Q_{АСМ} < 0$ допустимая разность частот составляет $\pm 8 \text{ Гц}$ [29].

Между тем по данным разработчика ОАО «Уралэлектротяжмаш» для АС ЭМПЧ типа АСМ+СМ мощностью 160 МВт допустимая разность частот составляет $\pm 2 \text{ Гц}$, а при режимах $Q_{АСМ} < 0$ допустимая разность частот составляет $\pm 4 \text{ Гц}$ [29].

Анализ проведенного исследования показал, что электромеханическая вставка переменного тока на базе асинхронизированных машин обладает рядом преимуществ по сравнению с передачами и вставками на постоянном токе: отсутствие высших гармоник; допустимая кратковременная перегрузка по току; меньшая занимаемая площадь.

Ключевые проблемы АС ЭМПЧ могут быть определены в процессе опыта эксплуатации. Дальнейшие исследования и разработки, а так же накопление опыта практического применения позволят определить пути совершенствования данной технологии.

1.3 Вращающийся трансформатор с изменяемой частотой вращения

Трансформатор с изменяемой частотой вращения – относительно недавняя разработка компании «General Electric», получившая название «Variable frequency transformer» (VFT). Первый в мире VFT мощностью 100 МВт, был установлен в Канаде на подстанции «Langlois» между сетями «New York-Ontario» (США) и «Hydro-Quebec» (Канада), работающих на частоте 60 Гц асинхронно и введен в эксплуатацию в 2004 году [53,79].

Проект Laredo – второй установленный в мире компании «General Electric» VFT и первый в США. Проект позволяет организовать асинхронную связь между США и Мексикой. Устройство VFT мощностью 100 МВт, установлено и введено в эксплуатацию в 2007 году на подстанции «Laredo» штат Техас (США) [105,110,129].

Проект Linden – первый многоканальный VFT с тремя параллельными каналами суммарной мощностью 300 МВт. Проект направлен на управление потоками мощности в синхронно работающих энергосистемах штатов Нью-Джерси и Нью-Йорка. Проект введен в эксплуатацию в 2009 году [46,106].

Объединение, асинхронно или синхронно работающих энергосистем, посредством технологии VFT происходит через подключение одной энергосистемы к статорной части, а другой энергосистемы к роторной части вращающегося трансформатора. Обмен мощностью между энергосистемами происходит с помощью магнитной муфты, через воздушный зазор [92].

Основными компонентами технологии VFT является вертикальный вращающийся трансформатор, двигатель постоянного тока и коллектор (рис. 1.2).

Обмотка ротора такой машины вращается относительно статора с регулируемой частотой скольжения. Вращение производится двигателем постоянного тока мощностью 3750 л.с. (на 48/93 об/мин). Изменение угла между ротором и статором VFT позволяет управлять уровнем и направлением передачи мощности через устройство. Плавное управление мощностью, передаваемой через устройство, осуществляется регулированием вращающего момента электродвигателя. Скорость вращения ротора выбирается в зависимости от возможной разницы в частотах сетей [1,93].

Инерция вращающейся системы достаточно высокая. При номинальном уровне передаваемой мощности она соответствует инерционной постоянной H , равной 26 отн. ед.·сек. Такая большая инерция поддерживает стабильность работы устройства во время возмущений в сети.

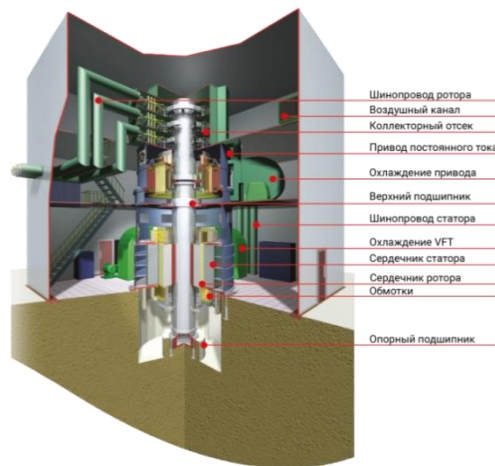


Рис. 1.2 Основные компоненты VFT

Оборудование подстанции, кроме установки VFT, включает в себя три шунтирующих батареи конденсаторов по 25 МВар, использующихся для компенсации реактивных намагничивающих токов, и два силовых трансформатора напряжением 120/17 кВ, и мощностью 133 МВА.

При пуске VFT фазовый угол автоматически устанавливается в нулевое положение с помощью синхронизирующего ключа, а регулятор мощности устанавливается на нулевую передачу мощности. Регулятор мощности представляет собой устройство с обратной связью, что позволяет поддерживать заданную величину передаваемой мощности на постоянном уровне.

В нормальном режиме работы напряжение на шинах устройства колеблется от 0,9 до $1,1 U_{ном}$, отклонения по частоте не превышает 0,5 Гц. При этом VFT поддерживает уровень передаваемой мощности с точностью до 2 % от заданных значений, а частота изменяется от 0 до 0,25 Гц/сек [1,93].

Однако в случае незначительных отклонений от нормального режима работы сети, такие как наброс или сброс нагрузки или удаленные повреждения, система управления устройством в течение 0,2 сек обеспечивает завершение всех переходных процессов с отклонением от выбранного режима работы в пределах 2% [1,93].

При значительных отклонениях от нормального режима работы сети, такие как отклонение напряжения, частоты или близкое повреждение, система, после отключения повреждения, восстанавливает режим и стабилизирует колебания мощности.

Примером этого может служить подстанция «Langlois» между сетями «New York-Ontario» (США) и «Hydro-Quebec» (Канада), где при отклонении частоты в пределах от 0,5 до 1,5 Гц время восстановления режима составляет 0,5 сек. При отклонениях частоты в диапазоне ± 3 Гц VFT остается в работе. Максимальные скорости повышения или пони-

жения частоты при полном максимальном отклонении ± 3 Гц: при 3 Гц/сек продолжительность 0,3 сек; при 2 Гц/сек – 0,6 сек; при 1 Гц/сек – 1,0 сек [1,93].

Подводя итог проведенного исследования, выделены основные преимущества VFT по отношению к вставкам постоянного тока:

- способность обеспечивать простую и контролируемую связь между асинхронно работающими энергосистемами, позволяя тем самым организовать экспорт и импорт электрической энергии, которые ранее не могли быть выполнены ввиду технических ограничений, таких как асинхронные границы или перегруженные межсистемные связи;
- меньшая площадь по сравнению с вставками постоянного тока аналогичной мощности, требующие, как правило, в 2 - 3 раз больше территории;
- меньшее количество гармонических искажений в сети действующих на энергетическое оборудование объединяемых энергосистем.

1.4 Исследование возможностей применения вращающегося трансформатора для связи энергосистем при скольжении по частоте больше 3 Гц

В качестве прототипа VFT для моделирования был выбран двигатель типа АК160М4, мощностью 14 кВт с фазным ротором.

На основе паспортных данных прототипа определены параметры схемы замещения устройства, которые были использованы для построения структурно-имитационной модели. Тестирование показало корректность работы структурно-имитационной модели, а также соответствие параметров аналога и модели, в рамках поставленной задачи. Паспортные данные и расчет параметров схемы замещения приведены в приложении А1 [14].

Структурно-имитационная модель устройства представляет собой вращающийся трансформатор [35-39,49], который объединяет две эквивалентные системы неограниченной мощности, асинхронные по отношению друг к другу, и рассчитана на номинальное фазное напряжение 230 В и рабочий ток 27 А. Эквивалентная энергосистема, подключенная к выводам статора, условно обозначена, как питающая (S-sending), с частотой f_s , а вторая эквивалентная система, подключенная к выводам ротора, принимающая (R-receiving) с частотой f_r . Схема включения исследуемого устройства приведена на рис. 1.3.

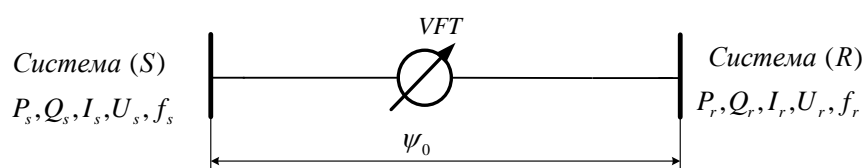


Рис. 1.3 Схема проведения эксперимента в статический режим работы

Первым этапом являлось исследование характеристик устройства в статическом режиме работы.

Статический режим работы подразумевает заторможенное положение ротора, такой режим работы возможен в случае, когда объединенные системы работают синхронно $f_s = f_r$.

При проведении статических исследований собственные частоты взаимодействующих систем задавались равными 50 Гц.

Результаты исследований в статических режимах позволили установить характерные особенности реагирования взаимодействующих систем на величину и знак регулируемого фазового сдвига между узловыми напряжениями электрической связи. Выявленные при этом особенности в дальнейшем могут быть использованы при задании целевых функций для оптимизации режимов работы электрических связей в процессе передачи мощности из одной электрической системы в другую.

В приложении А2 представлены материалы, отражающие результаты исследования устройства в статическом режиме работы. Для примера на рис. 1.4 и 1.5 приведены характеристики, иллюстрирующие зависимость активных и реактивных мощностей на передающей и принимающей системе, а так же значения токов при регулировании угла фазового сдвига ψ_0 и потерь активной мощности.

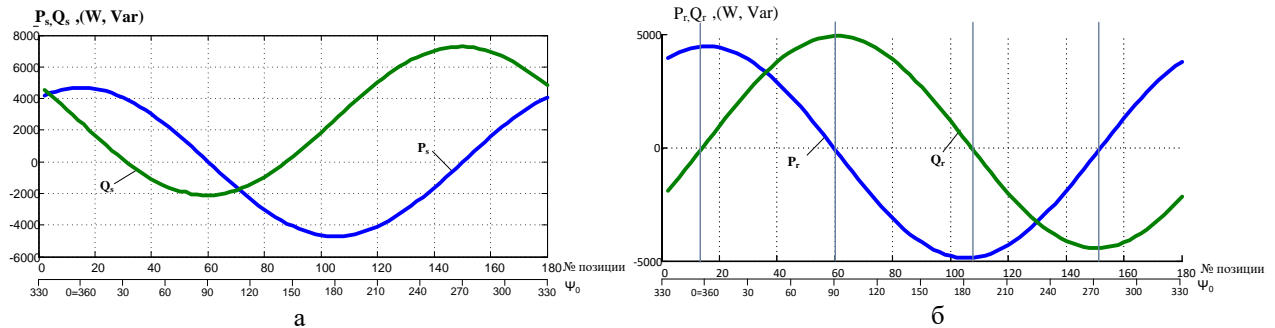


Рис. 1.4 Зависимость мощностей от номера позиции и задаваемого угла

а - передающая система, б - принимающая система

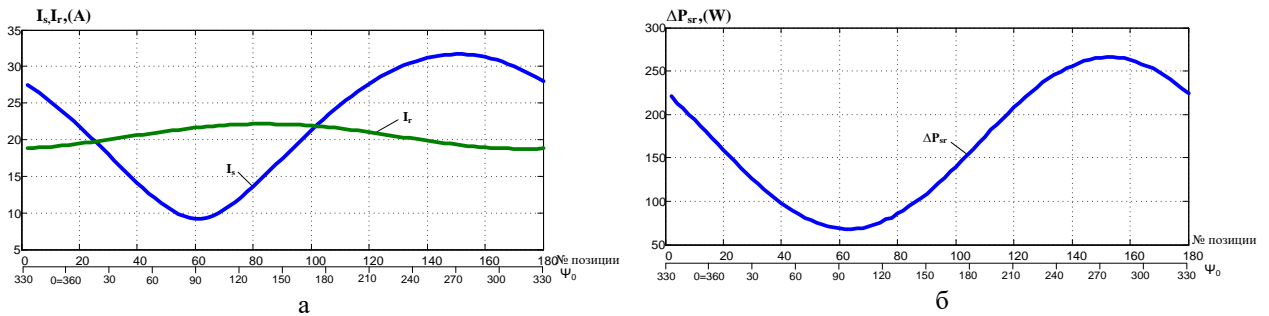


Рис. 1.5 Зависимость токов передающей и принимающей системы от номера позиции и задаваемого угла (а) и потерь мощности (б)

Анализируя характеристики можно сделать вывод о том, что изменяя фазовый сдвиг ψ_0 , на шинах приемной системы можно обеспечить практически любое по знаку и величине значение перетока активной и реактивной мощности в пределах задаваемой номинальной мощности установки.

Как показал анализ наиболее наглядные позиции для характеристик представленных на рис. 1.4 (б), являются следующие, (см. приложение А2 таблица А2):

Позиция №15 при $\psi_0 = -2^\circ$ - соответствует максимальному положительному значению активной мощности P_r при $Q_r \approx 0$.

Позиция №60 при $\psi_0 = 90^\circ$ - соответствует максимальному положительному значению реактивной мощности Q_r при $P_r \approx 0$.

Позиция № 108 при $\psi_0 = 186^\circ$ - соответствует максимальному отрицательному значению активной мощности P_r при $Q_r \approx 0$.

Позиция № 152 при $\psi_0 = 274^\circ$ - соответствует максимальному отрицательному значению реактивной мощности Q_r при $P_r \approx 0$.

Указанные позиции подтверждают возможность обеспечения УМС. На основании этого они приняты в качестве характерных при моделировании динамических режимов обмена активной и реактивной мощностей между электрическими системами с различными стандартами частоты переменного тока, поскольку определяют границы перехода режима из одного качественного состояния в другое.

Вторым этапом исследования стал расчет и анализ характеристик устройства в динамическом режиме работы.

Динамический режим работы устройства подразумевает вращение ротора машины с заданной скоростью для согласования асинхронно работающих систем. Для согласования систем, работающих с разницей в 10 Гц и объединенных вращающимся трансформатором, необходимо обеспечить скорость вращения ротора равную 300 об/мин. Схема исследуемого устройства приведена на рис 1.6.

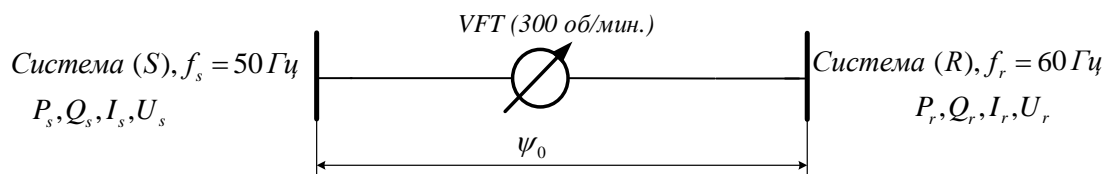


Рис. 1.6 Схема проведения эксперимента в динамическом режиме работы

Результаты исследования устройства в динамических режимах приведены в приложении А3. Характеристики (рис. 1.7-1.8) иллюстрируют зависимость активных и реак-

тивных мощностей, а так же значения токов и напряжений при регулировании угла фазового сдвига ψ_0 и включении устройства согласно рис.1.6.

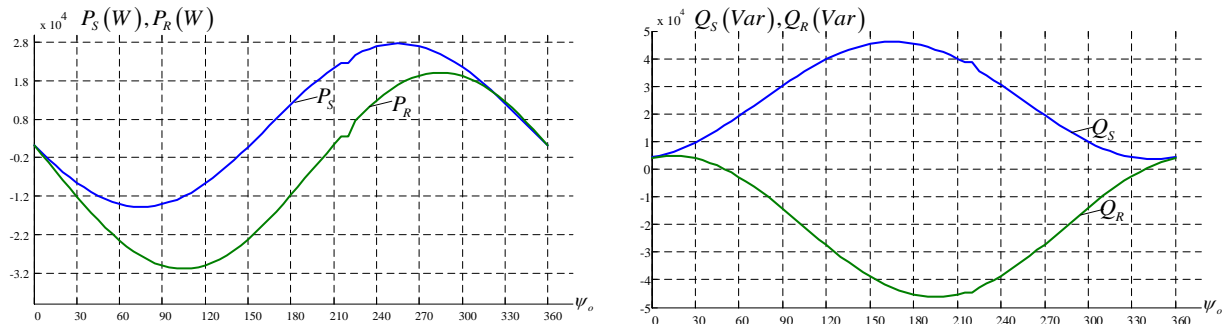


Рис. 1.7 Зависимость активных и реактивных мощностей от задаваемого угла ψ_0

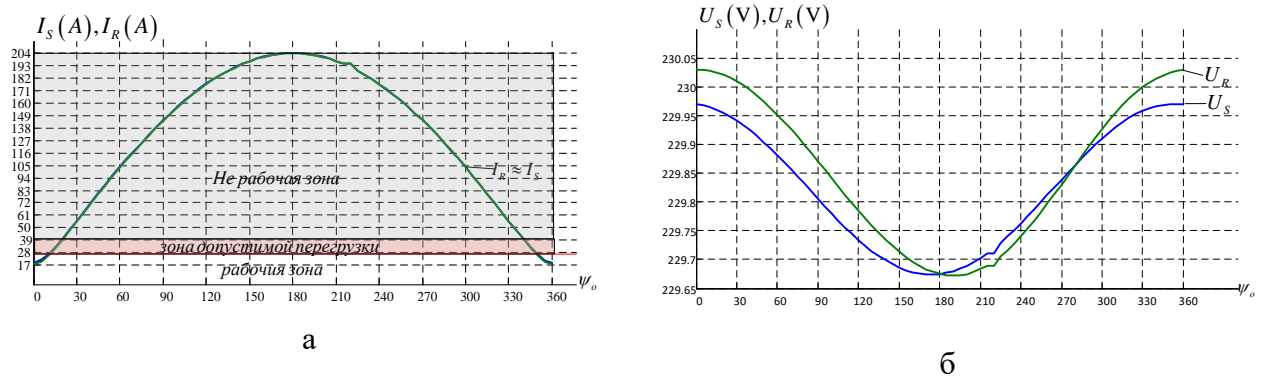


Рис. 1.8 График изменения токовой загрузки обмоток (а) и уровня напряжения (б) в зависимости от задаваемого угла ψ_0

Из графика, представленного на рис. 1.8 (а) видно, что при изменении угла между статором и ротором устройства больше $\pm 15^\circ$ происходит увеличение тока выше номинальных значений. Управление перетоком активной мощности происходит в узком диапазоне и очень резко, поворот ротора относительно статора на угол 1° соответствует 15% от установленной мощности устройства (рис. 1.7).

По анализу графика реактивных мощностей устройства установлено, что применение схемы без устройств компенсации реактивной мощности нецелесообразно. Учитывая, что данное устройство является трансформатором, то с увеличением угловой скорости вращения ротора, будет изменяться коэффициент трансформации, тем самым оказывая влияние на уровень напряжения на выводах устройства. В связи с этим в структурно – имитационную модель устройства введено компенсирующее устройство (КУ). Для поддержания необходимого значения тока в обмотках статора и увеличения зоны управляемости перетоком мощности, а так же более плавного изменения уровня передачи мощности, между ротором и принимающей системой, установлен источник неизменного тока (Interphase Power Controller (IPC)), рис. 1.9.

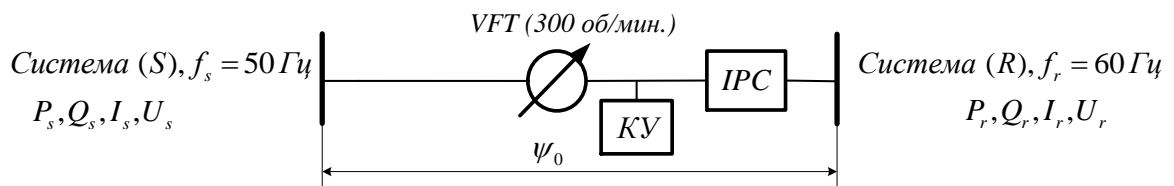


Рис. 1.9 Схема проведения эксперимента в динамическом режиме работы устройства с ИРС и компенсирующим устройством

Источник неизменного тока относится к семейству Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS) - контроллеров и обеспечивает однонаправленную передачу заданного уровня активной мощности между узлами транспортной электрической сети в условиях значительных колебаний угла нагрузки (ψ_0), что имеет место при резких изменениях режима работы энергосистемы.

В приложении А4 представлены результаты расчетных экспериментов в виде зависимостей мощностей токов и напряжений от угла ψ_0 и для примера приведены на рис. 1.10-1.11.

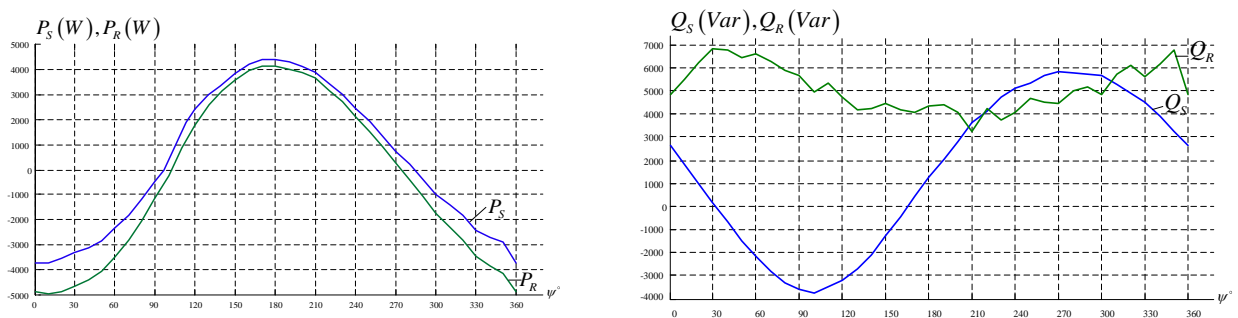


Рис. 1.10 Зависимость активных и реактивных мощностей от задаваемого угла ψ_0

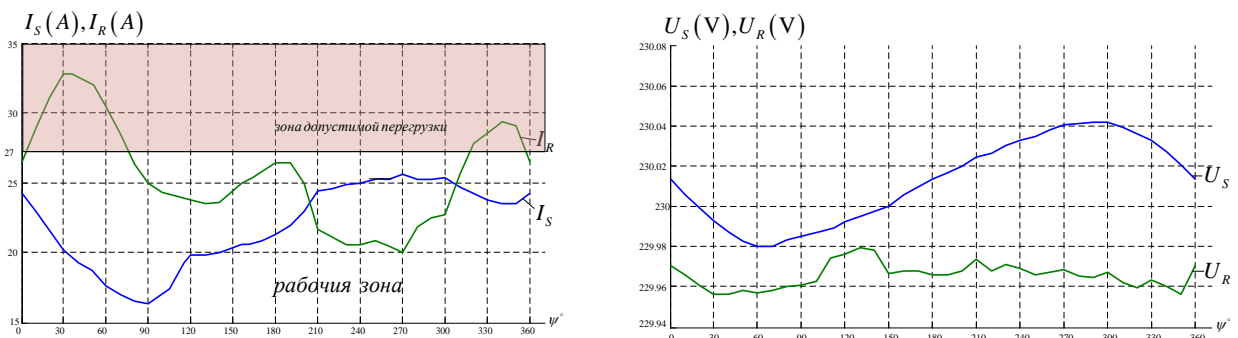


Рис. 1.11 График изменения токовой загрузки обмоток и уровня напряжения в зависимости от задаваемого угла ψ_0

Анализ зависимостей, представленных на рис. 1.10 позволяет говорить о возможности применения вращающегося трансформатора для связи энергосистем при частоте скольжения больше 3 Гц, а так же об обеспечении управления перетоком мощности меж-

ду передающей и принимающей системами, и удержании уровня передаваемой мощности с точностью до 3 % от заданных значений при $THD(I) < 1\%$. При этом напряжение колеблется от 0,9 до 1,1 $U_{ном}$, а токовая загрузка обмоток устройства не превышает допустимых пределов (рис. 1.11).

К недостаткам устройства такого типа, при организации УМС переменного тока при частоте скольжения больше 3 Гц, можно отнести наличие компенсирующего устройства, мощность которого, при объединении систем с разницей по частоте больше 3 Гц, превышает установленную мощность вращающегося трансформатора в два раза, а так же чрезмерно сложную систему управления устройством и компенсирующим устройством.

Вывод по первой главе

1. Рост потребления и производства электроэнергии неизбежно связан с развитием и объединением электроэнергетических систем. Следствием этого является увеличение обмена электрической энергией как внутри энергосистем, так и между энергосистемами по межсистемным связям. Это приводит к возрастанию роли межсистемных связей, повышению требований к их надежности, эффективности их функционирования и управляемости.

2. Для решения вопроса организации УМС применяются ВПТ и ППТ, как наиболее исследованные и нашедшие применение в энергосистемах разных стран мира. Ключевые проблемы передачи постоянным током детально изучены на практике и успешно преодолеваются, однако многие конструктивные решения пока остаются дорогостоящими.

3. На данный момент альтернативой ВПТ и ППТ являются устройства VFT и АС ЭМПЧ. Данная технология позволяет выполнить УМС на переменном токе между синхронно работающими системами с разными стандартами по поддержанию частоты. Однако вынужденное применение трущихся токосъемных контактов, ограниченный диапазон по частоте скольжения связываемых систем и проблемы, связанные с построением агрегатов большой мощности ограничивают область применения установок данного типа.

4. Результаты исследований вращающегося трансформатора в статических и динамических режимах с применением дополнительных средств регулирования (компенсирующего устройства и источника неизменного тока) показали возможность построения УМС при частоте скольжения большее $\pm 3 Гц$.

2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АППАРАТ ИССЛЕДОВАНИЯ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ УСТРОЙСТВ

2.1 Методология исследования

Решение поставленных в проводимом исследовании задач обусловило использование комплекса общенаучных методов и приемов, дифференцирующиеся на общелогические приемы, метод систематизации научных знаний, теоретические и экспериментальные методы исследования [20,25].

Среди основных общелогических приемов использовались следующие [21]:

Синтез – это метод исследования, который позволяет соединять элементы (части) объекта, расчлененного в процессе анализа, устанавливать связи между элементами и познавать объекты исследования как единое целое.

Анализ – это метод исследования, заключающийся в том, что предмет изучения мысленно или практически расчленяется на составные элементы (части объекта, или его признаки, свойства, отношения), при этом каждая из частей исследуется отдельно.

Указанные методы одновременно применялись на всем протяжении данного исследовательского процесса для обработки полученных результатов.

Аналогия – это метод научного познания, с помощью которого достигается знание об одних предметах или явлениях на основании их сходства с другими. Данный метод был применен при разработке прототипа вращающегося трансформатора для связи энергосистем при скольжении по частоте больше 3 Гц в пункте 1.4 [21].

Метод систематизации научных знаний, такой как классификация, применялся при проведении анализа существующих видов управляемой межсистемной связи в первой главе исследования.

Классификация – распределение тех или иных объектов по классам (отделам, рядам) в зависимости от их общих признаков, фиксирующее закономерные связи между классами объектов в единой системе конкретной отрасли знания [25].

В числе общенаучных методов на теоретическом уровне исследования применялись объяснение, формализация и математическое моделирование.

Объяснение – метод научного познания, с помощью которого составляется объективная основа изучаемого явления или процесса. Оно позволяет выдвинуть гипотезу или предложить теорию исследуемого класса явлений или процессов [21].

Формализация – это отображение объекта или явления в знаковой форме какого-либо искусственного языка (математики, химии и т.д.), с помощью которого производится формальное исследование их свойств [17].

Для исследования того или иного объекта математическими методами, включая и компьютерное моделирование, должна быть проведена формализация этого процесса, то есть построена математическая модель.

Под математическим моделированием понимается процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью, и исследование этой модели, позволяющее получать характеристики рассматриваемого реального объекта [20].

Метод объяснения применен на протяжении всего проводимого исследования. Методы формализации и математического моделирования использовались при математическом описании принципа работы устройства на основе источников неизменного тока и обосновании возможности реализации принципа кругового вращения фазы на основе статического трансформаторного устройства в пунктах 2.2 и 2.3 соответственно.

Среди методов экспериментального уровня исследования использовались: наблюдение, описание, измерение, сравнение, вычислительный эксперимент.

Наблюдение – это целенаправленное изучение предметов и явлений, в ходе которого исследователь получает знания о внешних сторонах, свойствах и отношениях объекта [9,17].

Описание – фиксация средствами естественного или искусственного языка результатов опыта (данных наблюдения или эксперимента) с помощью определенных систем обозначения, принятых в науке (схемы, графики, рисунки, таблицы, диаграммы и т.д.) [9,25].

Сравнение – метод, выявляющий сходство или различие объектов (либо ступеней развития одного и того же объекта), т. е. их тождество и различия [25].

Измерение – метод исследования, при котором устанавливается отношение одной величины к другой, служащей эталоном, стандартом [25].

Особым видом экспериментальных исследований является вычислительный эксперимент, нашедший широкое применение, когда проведение натуральных экспериментов и построение физической модели оказываются невозможными или слишком дорогостоящими.

Вычислительным экспериментом называют методологию и технологию исследований, основанных на применении прикладной математики и современных компьютерных технологий как технической базы при использовании математических моделей. [21]

Все вышеперечисленные методы экспериментального уровня исследования применялись при исследовании устройств на основе статических трансформаторных преобразователей частоты для организации УМС переменного тока.

Основополагающим для проведения настоящего исследования является метод имитационного моделирования, поскольку данный метод включает в себя концептуальное моделирование и логико-математическое (включая методы искусственного интеллекта) для целей описания отдельных подсистем и процессов модели, а также в процедурах обработки и анализа результатов вычислительного эксперимента и принятия решений. Указанный метод относится к методу научного познания как системный анализ.

Системный анализ представляет собой совокупность научных методов и практических приемов, которые могут быть использованы при исследовании и разработке сложных и сверхсложных объектов, а также при решении разнообразных проблем, возникающих при проектировании, создании и управлении технических и других систем [21,24].

Проведение системных исследований выполняется путем формализации описания системы, т.е. построением модели методом имитационного моделирования. Метод имитационного моделирования является наиболее эффективным и универсальным вариантом компьютерного моделирования в области исследования и управления сложными системами.

В качестве средства научного познания объектов исследования в данной работе выступает среда динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем MatLAB – Simulink, разработанный компанией MathWorks (США) и пакет инструментов SimPowerSystems, компании Hydro-Québec (Канада) интегрированный в MatLAB – Simulink.

SimPowerSystems (SPS) включает в себя инструменты для анализа и моделирования электроэнергетических систем. В данный пакет включены модели реальных электроэнергетических компонентов таких как:

- электрические элементы: трансформаторы; разрядники и выключатели; модели линий электропередачи; колебательные контуры (RLC); аварийные цепи; источники напряжения.
- электрические машины: модели синхронных и асинхронных машин, машин постоянного тока; системы возбуждения; модели гидравлических и паровых систем турбинных регуляторов.
- силовая электроника: диоды, упрощённые и сложные модели тиристоров, переключатели с управляющим электродом, модели IGBT (Insulated-gate bipolar transistor —

биполярный транзистор с изолированным затвором) и универсальные модели мостов, в которых можно выбрать стандартную топологию моста.

- элементы управления и измерения: измерение напряжения, тока, импеданса, вычисление активной и реактивной мощности, таймеры, анализаторы, мультиметры и т.д., предоставляющие возможность автоматизированного анализа электроэнергетических систем.

Модели SPS применяются для проектирования сложных электротехнических систем, сочетая методы имитационного и структурного моделирования.

Для имитационного моделирования объектов электроэнергетики SPS применяет двухступенчатый подход к решению задачи. На начальном этапе моделирования используется метод Рунге-Кутты, а далее метод обратного дифференцирования 2-го порядка. Так же SPS включает в себя алгоритмы интегрирования с переменным шагом, для выполнения высокоточной симуляции моделей реальных энергетических систем.

2.2 Математическая модель преобразователя частоты на основе источника неизменного тока

Общая картина распределения потоков мощности, в ветвях транспортных сетей объединенных энергосистем определяется величиной угла фазового сдвига δ_{sr} между напряжениями на передающем и приемном конце каждой ЛЭП. Любые колебания этого угла сопровождаются соответствующими колебаниями уровня передаваемой по линии активной мощности. Иногда это может приводить к неблагоприятным для объединенных энергосистем последствиям. В частности, опасные колебательные процессы могут возникать при синхронизации энергосистем с различными нормативными требованиями к оборудованию устройств регулирования частоты генерирующих источников. Необходимость предотвращения подобного рода явлений должна быть принята во внимание, например, при решении вопросов введения новых электрических связей между синхронно работающими энергосистемами с разными стандартами по поддержанию частоты.

Одним из эффективных технических средств, способствующих локализации распространения колебательных процессов в транспортных сетях электрических систем следует считать устройства типа РС [43, 58,60]. Указанные устройства относятся к категории пассивных элементов влияния на характер протекания процессов передачи и распределения электроэнергии, обладают высоким внутренним сопротивлением и не взаимодействует с другими устройствами управления потоками мощности. В настоящее время технология РС применяется преимущественно для ограничения токов короткого замыкания, а

- $|B1| = |B2| = B$ - собственные проводимости сопряженных реактивных элементов, определяемые расчетной мощностью одного модуля;

- I_{B1}, I_{B2} - токи собственных проводимостей сопряженных реактивных элементов;

- U_{B1}, U_{B2} - напряжения, прикладываемые к проводимостям сопряженных реактивных элементов,

- I_s, I_r - соответственно, токи на входе и выходе элементарного модуля преобразователя,

- U_s, U_r - напряжения на входе и выходе элементарного модуля преобразователя,

- δ_{sr} - угол фазового сдвига между напряжениями U_s и U_r , обусловленный наличием частоты скольжения между передающей и приемной электрическими системами.

Как следует из схемы, представленной на рис. 2.1, свободные концы сопряженных реактивных элементов LC подключаются к находящимся в квадратуре относительно питающего напряжения U_s напряжений $U_s e^{j\frac{\pi}{2}}$ и $U_s e^{-j\frac{\pi}{2}}$, которые могут быть получены с помощью согласующего трансформатора. К общей точке соединения сопряженных реактивных элементов подводится вектор напряжения приемной системы U_r , конец которого перемещается по дуге окружности с частотой скольжения $\omega_{sr} = \frac{d\delta_{sr}}{dt}$. Соответственно активная (P_r) и реактивная (Q_r) составляющие полной мощности (S_r) будут перераспределяться на выходных клеммах электрической схемы элементарного модуля.

Сущность электрических процессов, возникающих при этом в модуле, может быть описана следующими уравнениями:

Напряжения на сопряженных реактивных элементах:

$$\begin{cases} U_{B1} = U_r e^{j\delta_{sr}} - U_s e^{-j\frac{\pi}{2}} \\ U_{B2} = U_r e^{j\delta_{sr}} - U_s e^{j\frac{\pi}{2}} \end{cases},$$

Токи в сопряженных реактивных элементах:

$$\begin{aligned} I_{B1} &= -jB1 \cdot U_{B1} \\ I_{B2} &= jB2 \cdot U_{B2} \end{aligned},$$

В условиях равенства абсолютных значений проводимостей:

$$|B1| = |B2| = B,$$

Ток на выходе модуля является суммой токов сопряженных проводимостей:

$$I_r = I_{B1} + I_{B2} = jB(U_{B2} - U_{B1}),$$

$$U_{B2} - U_{B1} = \left[-e^{j\frac{\pi}{2}} + e^{-j\frac{\pi}{2}} \right] U_s = -j2U_s,$$

Тогда полная мощность на выходе модуля будет иметь следующий вид:

$$S_r = I_r \dot{U}_r = I_r U_s e^{-j\delta_{sr}} = 2BU_s U_r e^{-j\delta_{sr}} = P_r + jQ_r,$$

Характер изменения активной и реактивной мощности на выходе модуля описывается завершающими, представленную выше последовательность преобразований формулами:

$$P_r = 2BU_s U_r \cos \delta_{sr}; \quad Q_r = -2BU_s U_r \sin \delta_{sr}.$$

Графики зависимости активной и реактивной мощности на выходных клеммах модуля в зависимости от угла скольжения в режиме свободного обмена мощностью, изображенные на рис. 2.2, свидетельствуют о том, что активная мощность (P_r) изменяет направление перетока при значениях δ_{sr} , равных $\pm 90^\circ$, а реактивная (Q_r) – при значениях δ_{sr} , соответствующих 0° и 180° .

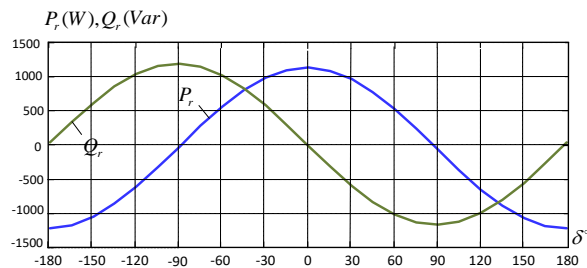


Рис. 2.2 – Графики зависимости активной и реактивной мощности на выходных клеммах модуля от угла скольжения в режиме свободного обмена мощностью

Упорядоченный однонаправленный поток активной мощности на выходных клеммах модуля может быть обеспечен за счет применения управляемых средств силовой электроники, как показано на рис. 2.3.

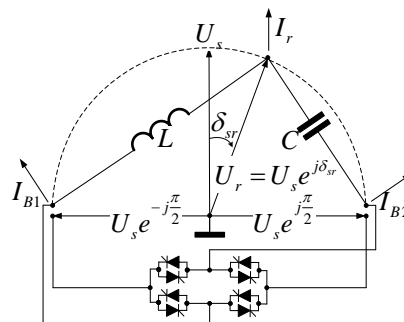


Рис. 2.3 – Схема поясняющая работу элементарного модуля преобразователя при использовании средств силовой электроники.

Соответствующие заданным условиям графические зависимости активной и реактивной мощности от угла δ_{sr} изображены на рис. 2.4. При этом важно отметить, что затененные «полуволны» активной мощности P_r характеризуют не процесс выпрямления, а процесс реверсирования активной и реактивной мощности переменного тока.

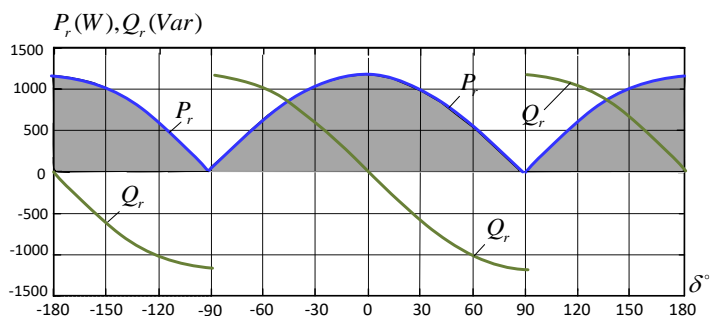


Рис. 2.4 – Графики зависимости активной и реактивной мощности на выходных клеммах модуля от угла скольжения при использовании средств силовой электроники.

Следует обратить внимание на тот факт, что реверсирование активной мощности будет происходить достаточно безболезненно, в то время как реактивная мощность претерпевает (в момент переключения) резкие и небезопасные для оборудования изменения. Применение многомодульной схемы может снизить резкие изменения сопровождающей реактивной мощности в момент переключения.

В рамках выполнения настоящей работы разработан многомодульный статический преобразователь, обеспечивающий взаимную компенсацию реактивных мощностей отдельных модулей при геометрическом суммировании соответствующих активных составляющих.

Совокупность управляемых элементарных модулей связанных между собой жесткой логической последовательностью операций взаимодействия отдельных элементов схемы позволяет создать преобразователь частоты нового типа, обладающий способностью осуществлять контролируемый обмен мощностью между асинхронно работающими электрическими системами. Схемный вариант такого устройства изображен на рис. 2.5.

На основе закона комбинаторики определено число возможных неповторяющихся комбинаций включения ключей A_n^k определяющееся по формуле:

$$A_n^k = n^k \quad 2.1$$

где

k – количество сопряженных реактивных элементов;

n – количество неповторяющихся комбинаций включения ключей для одного модуля (положение ключа на модуле).

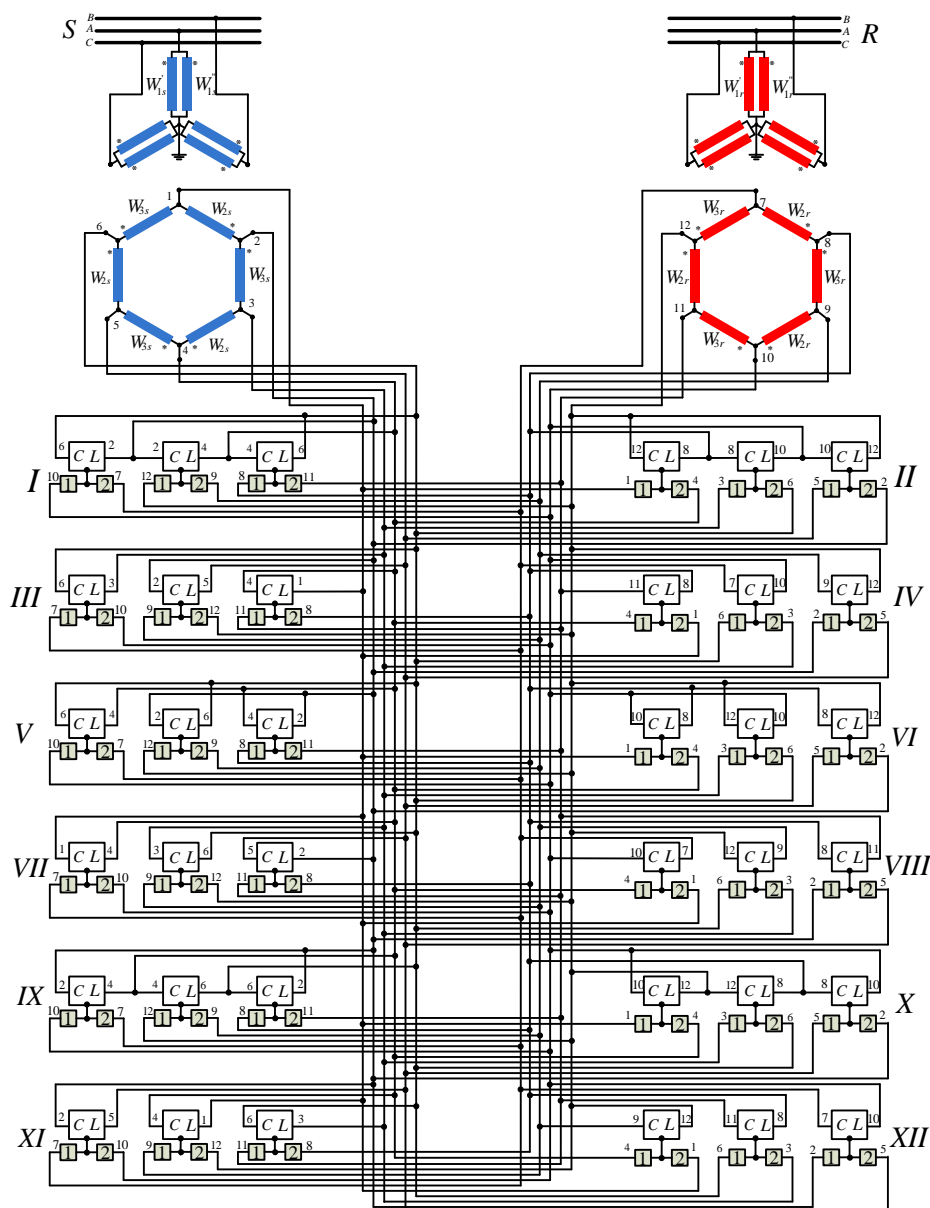


Рис. 2.5 – Электрическая схема статического преобразователя частоты выполненного на основе источников неизменного тока

Для схемного варианта преобразователя частоты, представленного на рис. 2.5, оснащенного шестью парами сопряженных реактивных элементов, согласно выражения 2.1, получены 4 096 неповторяющихся комбинаций включения ключей. При этом каждая пара сопряженных реактивных элементов обладает амплитудным значением передаваемой активной (P) и реактивной (Q) мощности, изменяющейся по косинусоидальному закону с начальной фазой.

Начальная фаза активной (P) и реактивной (Q) составляющих при 4 неповторяющихся комбинациях включения ключей на каждой паре сопряженных реактивных элементах представлены в таблицах 2.1 и 2.2 соответственно.

Таблица 2.1 Начальная фаза активной (P) составляющей в зависимости от положения ключей.

№ пары	Парные модули	Положение ключей на парных модулях, n			
		1 – 1	2 – 2	1 – 2	2 – 1
1	I, II	0^0	180^0	$P = 0$	$P = 0$
2	III, IV	150^0	330^0	$P = 0$	$P = 0$
3	V, VI	300^0	120^0	$P = 0$	$P = 0$
4	$VII, VIII$	90^0	270^0	$P = 0$	$P = 0$
5	IX, X	240^0	60^0	$P = 0$	$P = 0$
6	XI, XII	30^0	210^0	$P = 0$	$P = 0$

Таблица 2.2 Начальная фаза реактивной (Q) составляющей в зависимости от положения ключей.

№ пары	Парные модули	Положение ключей на парных модулях, n			
		1 – 1	2 – 2	1 – 2	2 – 1
1	I, II	90^0	270^0	$Q = 0$	$Q = 0$
2	III, IV	240^0	60^0	$Q = 0$	$Q = 0$
3	V, VI	30^0	210^0	$Q = 0$	$Q = 0$
4	$VII, VIII$	180^0	0^0	$Q = 0$	$Q = 0$
5	IX, X	330^0	150^0	$Q = 0$	$Q = 0$
6	XI, XII	120^0	300^0	$Q = 0$	$Q = 0$

Величину и направление передаваемой активной и реактивной мощности устройством в зависимости от комбинации включения ключей на парных модулях и угла δ_{sr} между передающей (S) и принимающей (R) системами, можно определить по следующим формулам [15]:

$$P_m = P_n^{I,II} + P_n^{III,IV} + P_n^{V,VI} + P_n^{VII,VIII} + P_n^{IX,X} + P_n^{XI,XII} + P_0 \quad 2.2$$

где:

m - номер комбинации включения ключей на парных модулях устройства, от 1 до 4 096;

$P_n^{I,II}, P_n^{III,IV}, P_n^{V,VI}, P_n^{VII,VIII}, P_n^{IX,X}, P_n^{XI,XII}$ - мгновенное значение активной мощности, передаваемой одной парой модулей в зависимости от включенной комбинации ключей на парном модуле;

n - положение ключей на парных модулях (1-1, 2-2, 1-2, 2-1);

P_0 - потери активной мощности в устройстве.

$$Q_m = Q_n^{I,II} + Q_n^{III,IV} + Q_n^{V,VI} + Q_n^{VII,VIII} + Q_n^{IX,X} + Q_n^{XI,XII} + Q_0 \quad 2.3$$

где:

m - номер комбинации включения ключей на парных модулях устройства, от 1 до 4 096;

$Q_n^{I,II}, Q_n^{III,IV}, Q_n^{V,VI}, Q_n^{VII,VIII}, Q_n^{IX,X}, Q_n^{XI,XII}$ - мгновенное значение реактивной мощности, передаваемой одной парой модулей в зависимости от включенной комбинации ключей на парном модуле;

n - положение ключей на парных модулях (1-1, 2-2, 1-2, 2-1);

Q_0 - потери реактивной мощности в устройстве.

В соответствии с таблицей 2.1, величина и направление передаваемой активной мощности через первую пару модулей, в зависимости от комбинации включенных выключателей с учетом начальной фазы и в зависимости от угла δ_{sr} между передающей (S) и принимающей (R) системами, определяется по следующей формуле:

$$P_n^{I,II} = P \cdot \cos(\delta_{sr} - 0) = P \cdot \cos \delta_{sr}, \text{ при } n = 1-1 \quad 2.4$$

Выражения, позволяющие определить величину и направление передаваемой активной и реактивной мощности, для всех последующих пар приведены в таблицах 2.3 и 2.4 соответственно.

Таблица 2.3 Величина и направление передаваемой активной (P) составляющей в зависимости от положения ключей и угла δ_{sr} .

№ пары	Парные модули	Положение ключей на парных модулях, n			
		1 – 1	2 – 2	1 – 2	2 – 1
1	I, II	$P \cdot \cos \delta_{sr}$	$-P \cdot \cos \delta_{sr}$	0	0
2	III, IV	$P \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \delta_{sr} + \frac{1}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	$P \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \delta_{sr} - \frac{1}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	0	0
3	V, VI	$P \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \cos \delta_{sr} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	$P \cdot \left(-\frac{1}{2} \cdot \cos \delta_{sr} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	0	0
4	$VII, VIII$	$P \cdot \sin \delta_{sr}$	$-P \cdot \sin \delta_{sr}$	0	0

№ пары	Парные модули	Положение ключей на парных модулях, n			
		1 – 1	2 – 2	1 – 2	2 – 1
5	<i>IX, X</i>	$P \cdot \left(-\frac{1}{2} \cdot \cos \delta_{sr} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	$P \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \cos \delta_{sr} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	0	0
6	<i>XI, XII</i>	$P \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \delta_{sr} + \frac{1}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	$P \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \delta_{sr} - \frac{1}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	0	0

Таблица 2.4 Величина и направление передаваемой реактивной (Q) составляющей в зависимости от положения ключей и угла δ_{sr} .

№ пары	Парные модули	Положение ключей на парных модулях, n			
		1 – 1	2 – 2	1 – 2	2 – 1
1	<i>I, II</i>	$Q \cdot \sin \delta_{sr}$	$-Q \cdot \sin \delta_{sr}$	0	0
2	<i>III, IV</i>	$Q \cdot \left(-\frac{1}{2} \cdot \cos \delta_{sr} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	$Q \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \cos \delta_{sr} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	0	0
3	<i>V, VI</i>	$Q \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \delta_{sr} + \frac{1}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	$Q \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \delta_{sr} - \frac{1}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	0	0
4	<i>VII, VIII</i>	$-Q \cdot \cos \delta_{sr}$	$Q \cdot \cos \delta_{sr}$	0	0
5	<i>IX, X</i>	$Q \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \delta_{sr} - \frac{1}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	$Q \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \delta_{sr} + \frac{1}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	0	0
6	<i>XI, XII</i>	$Q \cdot \left(-\frac{1}{2} \cdot \cos \delta_{sr} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	$Q \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \cos \delta_{sr} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	0	0

По результатам выполнения расчета всех 4096 комбинаций включения ключей были определены возможные уровни передаваемых мощностей для исследуемого устройства. Результаты представлены в виде области возможных значений передаваемой мощности нанесенной на комплексную плоскость в P, Q - координатах, на рис. 2.6.

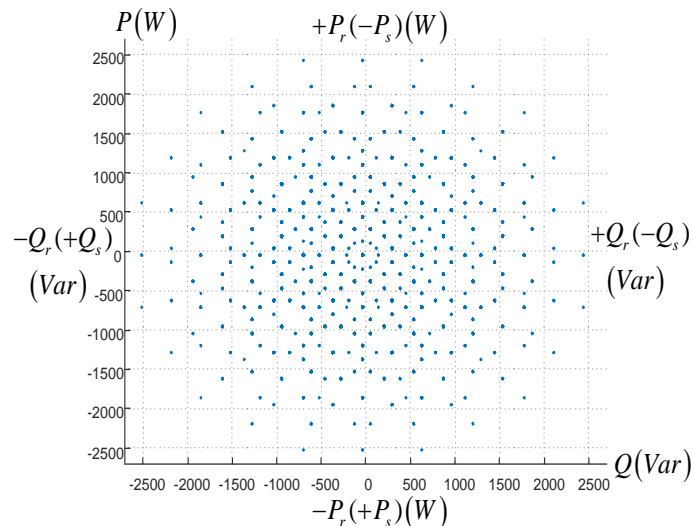


Рис. 2.6 Комплексная плоскость значений передаваемых мощностей на входе и выходе устройства

Рис. 2.6 иллюстрирует процесс передачи мощности из передающей системы (S) в приемную систему (R). Знаки «+» и «-» следует читать следующим образом:

Для передающей системы (S):

- знак «+» - указывает на передачу мощности в приемную систему (R);
- знак «-» - указывает на прием мощности из приемной системы (R).

Для приемной системы (R):

- знак «+» - указывает на прием мощности из передающей системы (S);
- знак «-» - указывает на передачу мощности в передающую систему (S).

Анализ полученных данных позволил выявить цикл из 71 уникального варианта стабильной передачи активной и реактивной мощности по заданной диаграмме переключения ключей при согласовании частоты. На рис. 2.7 представлен один из 71 уникального варианта стабильной передачи мощности, в частности приведен режим максимального уровня передачи активной составляющей мощности в процессе организации УМС двух синхронно работающих энергосистем но с разными стандартами по поддержанию частоты.

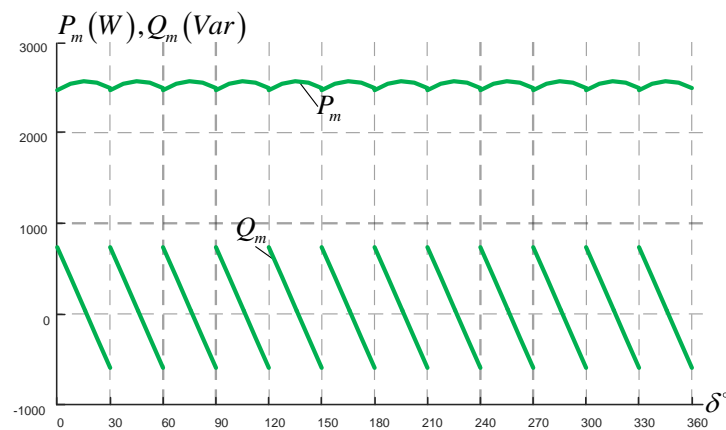


Рис. 2.7 Сумма расчетных значений активных и реактивных мощностей модулей при статическом состоянии устройства

Вариант преобразовательного устройства на базе технологии ИРС может быть применен в качестве «частотной развязки» между системами, содержащими значительную долю ВИЭ. Кроме того, данный вариант преобразователя может быть применён в качестве

УМС синхронно работающих энергосистем, но с разными стандартами по поддержанию частоты.

2.3 Математическое обоснование возможности реализации принципа кругового вращения фазы на основе статического трансформаторного устройства

Обоснование возможности реализации принципа кругового преобразования на статическом трансформаторном устройстве сделано на примере схемы рис.2.8.

Рассматриваемое трансформаторное устройство имеет одну трехфазную систему первичных обмоток и две трехфазные системы вторичных обмоток.

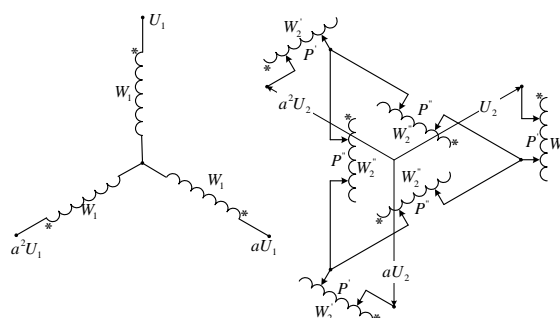


Рис. 2.8 Схема рассматриваемого варианта устройства

Первичные обмотки соединены в звезду. Одна система вторичных обмоток соединена в треугольник, к вершинам которого подключены соответствующие фазы вторичных обмоток другой системы. Условием нормальной работы схемы рис. 2.8 является общий закон перемещения всех контактов P' и P'' . При этом каждая фаза системы выходных напряжений синтезируется путем геометрического суммирования напряжений соответствующих фаз вторичных обмоток рис. 2.9.

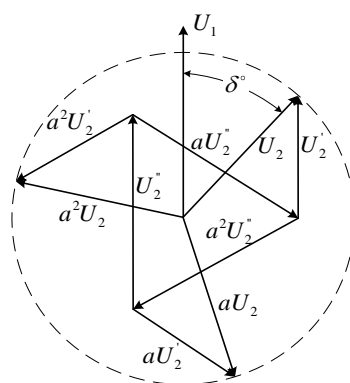


Рис. 2.9 Векторная диаграмма напряжений устройства

Пусть r_1 , r_2' , r_2'' - активные сопротивления первичной и вторичных обмоток; M_{12}' и M_{12}'' - взаимные индуктивности между первичной и вторичными обмотками:

$$M'_{12} = k_1 \sqrt{L_1 L_2}; \quad M''_{12} = k_2 \sqrt{L_1 L_2}; \quad M''_{22} = k_3 \sqrt{L_1 L_2}$$

где

k_1, k_2, k_3 - соответствующие коэффициенты электромагнитной связи. В дальнейших рассуждениях принято, что магнитные цепи устройства не насыщены. Условия анализа режима преобразования частоты представлены на рис. 2.10.

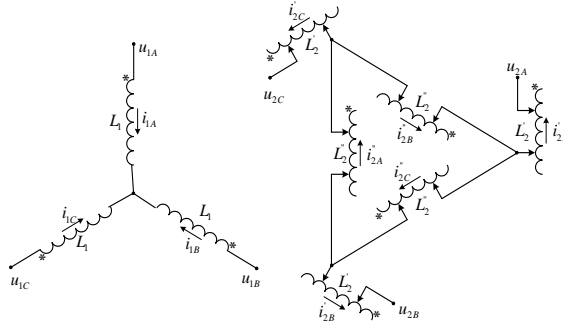


Рис. 2.10 Схема, поясняющая условия анализа режима преобразования частоты

Уравнения равновесия ЭДС для первичных обмоток имеют вид:

$$\begin{aligned} u_{1A} - r_1 i_{1A} - p(L_1 i_{1A} - M'_{12} i'_{2A} - M''_{12} i''_{2A}) &= 0 \\ u_{1B} - r_1 i_{1B} - p(L_1 i_{1B} - M'_{12} i'_{2B} - M''_{12} i''_{2B}) &= 0 \\ u_{1C} - r_1 i_{1C} - p(L_1 i_{1C} - M'_{12} i'_{2C} - M''_{12} i''_{2C}) &= 0 \end{aligned} \quad 2.5$$

где $p = \frac{d}{dt}$.

Вычитая из второго уравнения третье, получаем:

$$u_{1B} - u_{1C} - r_1 (i_{1B} - i_{1C}) - p[L_1 (i_{1B} - i_{1C}) - M'_{12} (i'_{2B} - i'_{2C}) - M''_{12} (i''_{2B} - i''_{2C})] = 0. \quad 2.6$$

Принимаем во внимание следующие условия:

$$\begin{aligned} u_{1A} + u_{1B} + u_{1C} &= 0; \quad i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0; \\ i'_{2A} - i'_{2B} &= i'_{2C}; \quad i''_{2C} - i''_{2A} = i'_{2B}, \end{aligned} \quad 2.7$$

При этих условиях получаем:

$$\begin{aligned} u_{1B} - u_{1C} - r_1 (i_{1B} - i_{1C}) - p[L_1 (i_{1B} - i_{1C}) - M'_{12} (i'_{2B} - i'_{2C}) - M''_{12} i'_{2A}] &= 0; \\ 3u_{1A} - 3r_1 i_{1A} - 3p(L_1 i_{1A} - M'_{12} i'_{2A}) - pM''_{12} (i'_{2B} - i'_{2C}) &= 0. \end{aligned} \quad 2.8$$

Выходное напряжение u_{2A} связано с выходными напряжениями двух других фаз следующим образом:

$$\begin{aligned} u_{2A} + r_2 i'_{2A} + p(L_2 i'_{2A} + M''_{22} i''_{2A} - M'_{12} i'_{1A}) - r_2 i'_{2C} - p(L_2 i'_{2C} + M''_{22} i'_{2C} - M''_{12} i'_{1C}) - r_2 i'_{2B} - \\ - p(L_2 i'_{2B} + M''_{22} i''_{2B} - M'_{12} i'_{1B}) - u_{2B} = 0; \end{aligned} \quad 2.9$$

$$u_{2A} + r_2 i'_{2A} + p(L_2 i'_{2A} + M_{22}'' i_{2A} - M_{12}' i_{1A}) + r_2 i''_{2B} + p(L_2 i''_{2B} + M_{22}'' i'_{2B} - M_{12}'' i_{1B}) - r_2 i'_{2C} - p(L_2 i'_{2C} + M_{22}'' i_{2C} - M_{12}' i_{1C}) - u_{2C} = 0.$$

Полученные уравнения просуммируем с учетом условий 2.5. Приходим к следующему результату:

$$3u_{2A} + (3r_2' + r_2'') i'_{2A} + (3L_2' + L_2'') p i'_{2A} - 3M_{12}' p i_{1A} - M_{12}'' p (i_{1B} - i_{1C}) = 0. \quad 2.10$$

Сформируем новую систему уравнений, используя для этого выражения 2.8 и 2.10:

$$\begin{aligned} u_{1B} - u_{1C} - r_1 (i_{1B} - i_{1C}) - p [L_1 (i_{1B} - i_{1C}) - M_{12}' (i'_{2B} - i'_{2C}) - M_{12}'' i'_{2A}] &= 0; \\ 3u_{1A} - 3r_1 i_{1A} - 3p (L_1 i_{1A} - M_{12}' i'_{2A}) - p M_{12}'' (i'_{2B} - i'_{2C}) &= 0; \end{aligned} \quad 2.11$$

$$3u_{2A} + (3r_2' + r_2'') i'_{2A} + (3L_2' + L_2'') p i'_{2A} - 3M_{12}' p i_{1A} - M_{12}'' p (i_{1B} - i_{1C}) = 0.$$

Согласно первому уравнению системы 2.11 имеем:

$$p (i'_{2B} - i'_{2C}) = -\frac{1}{M_{12}'} (u_{1B} - u_{1C}) + \frac{r_1}{M_{12}'} (i_{1B} - i_{1C}) + \frac{L_1}{M_{12}'} p (i_{1B} - i_{1C}) - \frac{M_{12}''}{M_{12}'} p i'_{2A}$$

Данное выражение подставим во второе уравнение системы 2.11:

$$\begin{aligned} 3u_{1A} + \frac{M_{12}''}{M_{12}'} (u_{1B} - u_{1C}) - r_1 \left[3i_{1A} + \frac{M_{12}''}{M_{12}'} (i_{1B} - i_{1C}) \right] - L_1 \left[3p i_{1A} + \frac{M_{12}''}{M_{12}'} p (i_{1B} - i_{1C}) \right] + \\ + \left(3M_{12}' + \frac{M_{12}''^2}{M_{12}'} \right) p i'_{2A} = 0. \end{aligned}$$

Полученный результат представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} p i'_{2A} = \frac{1}{3M_{12}' + M_{12}''} \left[-3M_{12}' u_{1A} - M_{12}'' \cdot (u_{1B} - u_{1C}) + 3r_1 M_{12}' i_{1A} + r_1 M_{12}'' (i_{1B} - i_{1C}) + \right. \\ \left. + 3L_1 M_{12}' p i_{1A} + L_1 M_{12}'' p (i_{1B} - i_{1C}) \right] = 0. \end{aligned} \quad 2.12$$

Интегрируя обе части этого уравнения, определим выражение для тока i'_{2A} :

$$\begin{aligned} i'_{2A} = \frac{1}{3M_{12}' + M_{12}''} \left[-3M_{12}' \frac{1}{p} u_{1A} - M_{12}'' \cdot \frac{1}{p} (u_{1B} - u_{1C}) + 3r_1 M_{12}' \frac{1}{p} i_{1A} + r_1 M_{12}'' \cdot \right. \\ \left. \cdot \frac{1}{p} (i_{1B} - i_{1C}) + 3L_1 M_{12}' i_{1A} + L_1 M_{12}'' \cdot (i_{1B} - i_{1C}) \right] = 0 \end{aligned} \quad 2.13$$

Выражения для i'_{2A} и $p i'_{2A}$ подставим в третье уравнение системы 2.11. После алгебраических преобразований получим:

$$\begin{aligned}
& 3u_{2A} - \frac{3M_{12}'}{3M_{12}'^2 + M_{12}''^2} \left[(3r_2' + r_2'') \frac{1}{p} u_{1A} + (3L_2' + L_2'') u_{1A} \right] - \frac{M_{12}''}{3M_{12}'^2 + M_{12}''^2} \left[(3r_2' + r_2'') \frac{1}{p} \cdot \right. \\
& \cdot (u_{1B} - u_{1C}) + (3L_2' + L_2'') (u_{1B} - u_{1C}) \left. \right] + \frac{3M_{12}'}{3M_{12}'^2 + M_{12}''^2} \left\{ L_1 (3L_2' + L_2'') p i_{1A} + [L_1 \cdot \right. \\
& \cdot (3r_2' + r_2'') + r_1 (3L_2' + L_2'')] i_{1A} + r_1 (3r_2' + r_2'') \cdot \frac{1}{p} i_{1A} \left. \right\} + \frac{M_{12}''}{3M_{12}'^2 + M_{12}''^2} \left\{ L_1 (3L_2' + L_2'') p (i_{1B} - i_{1C}) + \right. \\
& + [r_1 (3L_2' + L_2'') + L_1 (3r_2' + r_2'')] (i_{1B} - i_{1C}) + r_1 (3r_2' + r_2'') \frac{1}{p} (i_{1B} - i_{1C}) \left. \right\} - 3pM_{12}' i_{1A} - \\
& - pM_{12}'' (i_{1B} - i_{1C}) = 0.
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Круговое преобразование фазы выходного напряжения относительно приложенного будет обеспечено, если изменение числа витков вторичных обмоток фазорегулятора осуществляется в соответствии со следующим законом:

$$W_2' = W_2 \cos \omega_c t; \quad W_2'' = \sqrt{3} W_2 \sin \omega_c t,$$

где

$$\omega_c = \omega_2 - \omega_1 = \frac{d\delta}{dt};$$

- ω_1 - частота переменного тока передающей системы;

- ω_2 - частота переменного тока приемной системы.

При этом собственные индуктивности вторичных обмоток L_2' , L_2'' и взаимные индуктивности M_{12}' и M_{12}'' определяются выражениями:

$$L_2' = L_2 \cos^2 \omega_c t; \quad L_2'' = 3L_2 \sin^2 \omega_c t;$$

$$M_{12}' = k_1 \sqrt{L_1 L_2} \cos \omega_c t; \quad M_{12}'' = \sqrt{3} k_2 \sqrt{L_1 L_2} \sin \omega_c t.$$

Для активных сопротивлений вторичных обмоток справедливы соотношения:

$$r_2' = r_2 \cos \omega_c t; \quad r_2'' = \sqrt{3} r_2 \sin \omega_c t.$$

Нормальный режим работы статического преобразователя предполагает наличие симметричного трехфазного напряжения на его входных зажимах и симметрию фазных токов в обмотках:

$$\begin{aligned}
u_{1A} &= U_1 \sin \omega_1 t \\
u_{1B} - u_{1C} &= \sqrt{3} U_1 \cos \omega_1 t \\
i_{1A} &= I_1 \sin(\omega_1 t - \varphi) \\
i_{1B} - i_{1C} &= \sqrt{3} I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi)
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Выражения для собственных и взаимных индуктивностей, активных сопротивлений обмоток, а также соотношения 2.15 подставим в уравнение 2.14. Приходим к результату:

$$\begin{aligned}
u_{2A} = & \frac{1}{\sqrt{L_1 L_2} (k_1^2 \cos^2 \omega_c t + k_2^2 \sin^2 \omega_c t)} \cdot \left\{ \frac{L_2}{2} [(k_1 + k_2) \sin(\omega_1 + \omega_c)t + (k_1 - k_2) \cdot \right. \\
& \cdot \sin(\omega_1 - \omega_c)t] - \frac{r_2}{\sqrt{3} \omega_1} \cos\left(\omega_c t - \frac{\pi}{6}\right) \cdot [(k_1 + k_2) \cos(\omega_1 + \omega_c)t + (k_1 - k_2) \cdot \cos(\omega_1 - \omega_c)t] \left. \right\} \cdot \\
& \cdot U_1 + \frac{1}{\sqrt{L_1 L_2} (k_1^2 \cos^2 \omega_c t + k_2^2 \sin^2 \omega_c t)} \cdot \left\{ A [(k_1 + k_2) \cos[(\omega_1 + \omega_c)t - \varphi] + (k_1 - k_2) \cdot \right. \\
& \cdot \cos[(\omega_1 - \omega_c)t - \varphi]] - B [(k_1 + k_2) \sin[(\omega_1 + \omega_c)t - \varphi] + (k_1 - k_2) \sin[(\omega_1 + \omega_c)t - \varphi]] \left. \right\} \cdot \\
& \cdot I_1 + \frac{1}{2} \omega_1 \sqrt{L_1 L_2} [(k_1 + k_2) \cos[(\omega_1 - \omega_c)t - \varphi] + (k_1 - k_2) \cos[(\omega_1 - \omega_c)t - \varphi]] I_1.
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$A = \frac{r_1 r_2 \cos\left(\omega_c t - \frac{\pi}{6}\right)}{\sqrt{3} \omega_1} - \frac{1}{2} L_1 L_2 \omega_1; \quad B = \frac{L_1 r_2 \cos\left(\omega_c t - \frac{\pi}{6}\right)}{\sqrt{3}} - \frac{1}{2} r_1 L_2.$$

Равенство 2.16 устанавливает связь между мгновенными значениями входного и выходного напряжений статического устройства, работающего в режиме преобразования частоты. Оно свидетельствует о наличии в выходном напряжении устройства составляющих двух частот: $\omega_1 + \omega_c$ и $\omega_1 - \omega_c$. Однако амплитуды напряжений указанных частот различны и зависят от соотношения коэффициентов электромагнитной связи обмоток k_1 и k_2 . Соответствующим расположением фазных обмоток можно добиться равенства указанных коэффициентов: $k_1 = k_2 = k$.

В этом случае равенство 2.16 принимает вид:

$$\begin{aligned}
u_{2A} = & \frac{1}{k \sqrt{L_1 L_2}} \left\{ [L_2 \sin(\omega_1 + \omega_c)t - \frac{2r_2}{\sqrt{3} \omega_1} \cdot \cos\left(\omega_c t - \frac{\pi}{6}\right) \cos(\omega_1 + \omega_c)t] U_1 + [2A \cdot \right. \\
& \cdot \cos[(\omega_1 - \omega_c)t - \varphi] - 2B \sin[(\omega_1 + \omega_c)t - \varphi]] I_1 \left. \right\} + k \omega_1 \sqrt{L_1 L_2} \cos[(\omega_1 + \omega_c)t - \varphi] I_1
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Полагаем далее, что $r_1 = \omega_1 L_1$ и $r_2 = \omega_1 L_2$ - допущение, справедливое для рассматриваемого класса устройств. Тогда можно считать, что $A = -\frac{1}{2} L_1 L_2 \omega_1$; $B = 0$, а равенство 2.17 преобразуется к виду:

$$u_{2A} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} U_1 \sin(\omega_1 + \omega_c)t - \frac{1 - k^2}{k} \omega_1 \cdot \sqrt{L_1 L_2} I_1 \cos[(\omega_1 + \omega_c)t - \varphi]$$

Обозначив $\omega_1 + \omega_c = \omega_2$, придем к результату:

$$u_{2A} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} U_1 \sin \omega_2 t - \frac{1-k^2}{k} \omega_1 \sqrt{L_1 L_2} \cdot I_1 \cos(\omega_2 t - \varphi).$$

Аналогично можно выразить и напряжения других фаз:

$$u_{2B} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} U_1 \sin\left(\omega_2 t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1-k^2}{k} \omega_1 \cdot \sqrt{L_1 L_2} I_1 \cos\left(\omega_2 t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_{2C} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} U_1 \sin\left(\omega_2 t + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1-k^2}{k} \omega_1 \cdot \sqrt{L_1 L_2} I_1 \cos\left(\omega_2 t - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Выражения, характеризующие мгновенные значения выходных напряжений фаз (u_{2A}, u_{2B}, u_{2C}) рассматриваемого преобразователя, свидетельствует о наличии в каждом из них двух членов. Первые идентичны соответствующим выражениям для идеального статического преобразователя частоты трансформаторного типа, а вторые определяются наличием потоков рассеяния обмоток и обращаются в нуль при их отсутствии.

Следует отметить, что приближение к условиям динамического управления может быть реализовано за счет секционирования вторичных обмоток и соединения отдельных секций между собой с помощью силовых ключей, обеспечивающих независимость момента переключения от мгновенного значения тока нагрузки.

Полученные результаты подтверждают возможность работы описанного устройства в качестве преобразователя частоты питающего напряжения.

Полученные зависимости достаточно хорошо описывают процесс преобразования частоты. Данное качество отвечает условиям работы устройства в составе асинхронной УМС переменного тока.

Выводы по второй главе

1. Описана методологическая основа, позволяющая достичь цели исследования, которая включает совокупность общенаучных методов и приемов, а так же системный анализ. Основополагающими методами для проведения исследования приняты методы математического и структурно имитационного моделирования, которые относятся к общенаучному методу познания и системному анализу соответственно. Средством для выполнения структурно – имитационного моделирования выбрана среда динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем MatLAB – Simulink – SimPowerSystems, имеющее ряд преимуществ по отношению к математическому и физическому моделированию. Одним из преимуществ пакета SPS является наглядность использование его для моделирования и анализа статического и динамического поведения системы.

2. Разработана схема и создана математическая модель устройства на основе источников неизменного тока, позволяющая обеспечить заданную величину и направле-

ние передаваемой активной и реактивной мощности при организации «частотной развязки» между синхронно работающими системами с разными стандартами по поддержанию частоты. Показана возможность обеспечения требуемых уровней передачи мощности в процессе частотного согласования [15];

3. Предложен схемный вариант и математическая модель трансформаторного устройства, доказывающая возможность создания статического трансформаторного устройства с круговым преобразованием фазы выходного напряжения. Проанализированы общие принципы работы трансформаторного преобразователя с круговым преобразованием фазы с определением возможности его применения в составе асинхронной УМС переменного тока. Получены основные соотношения, характеризующие процесс преобразования частоты при соответствующем выборе закона управления [128].

3. СТАТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ИСТОЧНИКОВ НЕИЗМЕННОГО ТОКА

3.1 Разработка схемы преобразователя частоты на основе источников неизменного тока

Для верификации, описанной в пункте 2.2 математической модели и принципиальной схемы рис.2.5, разработана структурно – имитационная модель преобразовательного устройства [76].

Опорными элементами имитационной модели преобразователя являются силовые трансформаторы, подключаемые к шинам передающей (S) и приемной (R) системы. Вторичные обмотки трансформаторов соединены по схеме правильного шестиугольника и позволяют получить две симметричные шестифазные системы напряжений, необходимые для реализации всей последовательности процессов управления режимом преобразования. Система вторичных обмоток каждого трансформатора связана со своим набором элементарных модулей (IPС), а через них с узлами вторичных обмоток (вершины шестиугольника) другого трансформатора. При этом отдельные элементарные модули образуют трехфазные блоки, пронумерованные римскими цифрами ($I \div XII$). Нечетные номера блоков относятся к системе (S), четные - к системе (R).

В результате реализации указанных схемных соединений, ток, поступающий в каждый узел шестиугольника вторичных обмоток трансформатора приемной системы, является суммой токов шести элементарных модулей питающей системы. Аналогичным образом, ток, оттекающий от каждого узла шестиугольника вторичных обмоток трансформатора передающей системы, становится суммой токов шести элементарных модулей приемной системы. При этом модули нечетных номеров «инжектируют», а модули четных номеров «абсорбируют» передаваемую электрическую энергию.

Указанные условия выполняются при соблюдении закона управления, определяемого достаточно простой диаграммой переключения модулей, представленной на рис. 3.1.

Модуль		I,II		III,IV		V,VI		VII,VIII		IX,X		XI,XII	
Диапазон δ°		$-90^\circ \div 90^\circ$		$-60^\circ \div 120^\circ$		$-30^\circ \div 150^\circ$		$0^\circ \div 180^\circ$		$30^\circ \div 210^\circ$		$60^\circ \div 240^\circ$	
Ключи	1	●		●	●			●	●			●	
	2		●	●		●	●			●	●		

Рис.3.1 Диаграмма переключения элементарных модулей преобразователя

Необходимо отметить, что параметры элементарных модулей преобразователя не одинаковы по величине. Как следует из принципиальной схемы рис. 2.5, одна половина модулей (*III, IV, VII, VIII, XI, XII*) подключается на двойное фазное напряжение, а другая половина (*I, II, V, VI, IX, X*) – на линейное напряжение вторичных обмоток силовых трансформаторов.

В связи с данным обстоятельством и необходимостью выравнивания рабочих токов всех элементарных модулей, проводимости сопряженных реактансов первой половины модулей должны быть уменьшены относительно проводимостей модулей второй половины в соответствии с соотношением $2/\sqrt{3}$. В дальнейшем четные модули условно обозначим элементами первого рода, нечетные - элементами второго рода.

Исходя из принятых для модели величин токов и напряжений, собственные величины сопряженных реактансов элементарных модулей первого рода соответствуют значениям $C = 40 \cdot 10^{-6} F$ и $L = 253,5 \cdot 10^{-3} H$, а модулей второго рода характеризуются значениями $C = 46,2 \cdot 10^{-6} F$ и $L = 219,5 \cdot 10^{-3} H$. Электрические величины подлежащие контролю и измерению в процессе эксперимента указаны на фрагменте схемы, представленной на рис. 3.2.

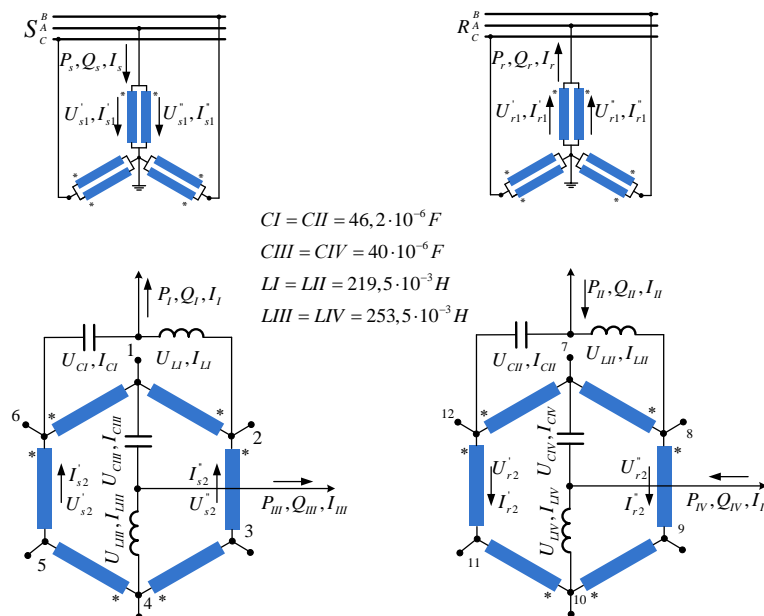


Рис.3.2 Собственные параметры модулей и обозначения измеряемых электрических величин имитационной модели преобразователя частоты

Имитационная модель преобразователя частоты выполнена на номинальное напряжение 230 В и ток 12 А, и оснащена необходимой системой измерения для проведе-

ния вычислительных экспериментов, воспроизводящих статические и динамические поведение устройства, рис. 3.3.

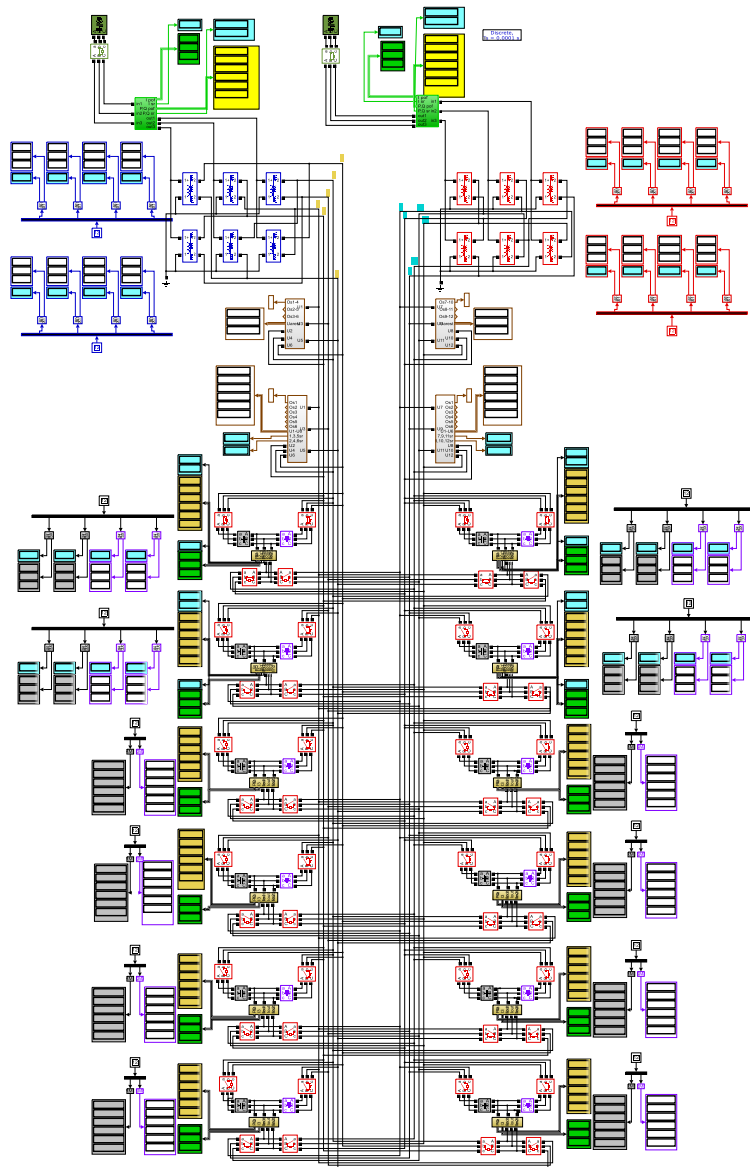


Рис. 3.3 Схема структурно – имитационной модели статического преобразователя частоты на основе источников неизменного тока

Результаты проведенных вычислительных экспериментов при работе исследуемого устройства позволили получить режимные характеристики как отдельных элементов, так и преобразователя в целом при статическом состоянии устройства и приведены в Приложении А6.

В качестве примера на рис.3.4 приведены характеристики изменения активных и реактивных мощностей на вводах и выводах преобразовательного устройства, представленные в зависимости от угла δ_{sr} при статическом состоянии преобразователя.

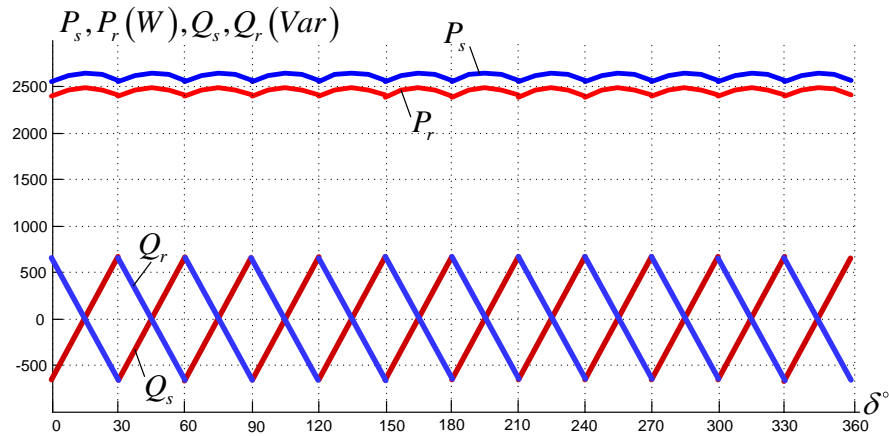


Рис.3.4 Экспериментальные значения активной и реактивной мощности на вводах и выводах устройства.

Анализируя графики рис.3.4. можно сделать вывод, что, при регулировании угла δ_{sr} в пределах диапазона $0^\circ \div 360^\circ$, кривые мощностей содержат 12 повторяющихся участков, появление которых обусловлено действием средств силовой электроники в соответствии с заданной диаграммой переключения. Между активной мощностью на входе P_s и выходе P_r устройства прослеживается разница, обусловленная наличием потерь мощности в трансформаторах. Так же обращает на себя внимание характер передачи реактивной мощности со стороны передающей Q_s и принимающей Q_r системы, который указывает на особенность работы устройства и свидетельствует о том, что в условиях динамического управления (т.е. в режиме преобразования частоты) средневзвешенный $\cos \varphi$ на входе и выходе установки равен единице.

Анализ, приведенных в Приложении А6 данных, свидетельствует о достаточно высокой стабильности уровня передаваемой активной мощности в процессе регулирования (величина отклонения не превышает 3,4% от заявленного значения).

Сравнительный анализ результатов, полученных на основе математической модели, в пункте 2.2 и в процессе структурно-имитационного моделирования показал, что [15]:

1. как метод математического, так и метод структурно-имитационного моделирования дают близкие результаты, о чем свидетельствует анализ характеристик, рис. 3.4, рис. 2.7;

2. математическое описание принципа работы устройства может быть применено для отображения характерных режимов работы, а также определения и анализа характеристик устройств такого типа при их изучении.

3.2 Исследование характеристик устройства при асимметричном управлении

Детальный анализ графика представленного на рис. 3.4 показал, что в момент работы силовых ключей в режиме согласования частоты происходит коммутация значительной сопровождающей реактивной мощности, что негативно сказывается на качестве преобразования. В этой связи предложено техническое решение позволяющее, снизить сопровождающую реактивную мощность в процессе работы преобразователя [75,76].

Принципиальная электрическая схема устройства, обеспечивающего улучшенные характеристики качества преобразования, представлена на рис. 3.5.

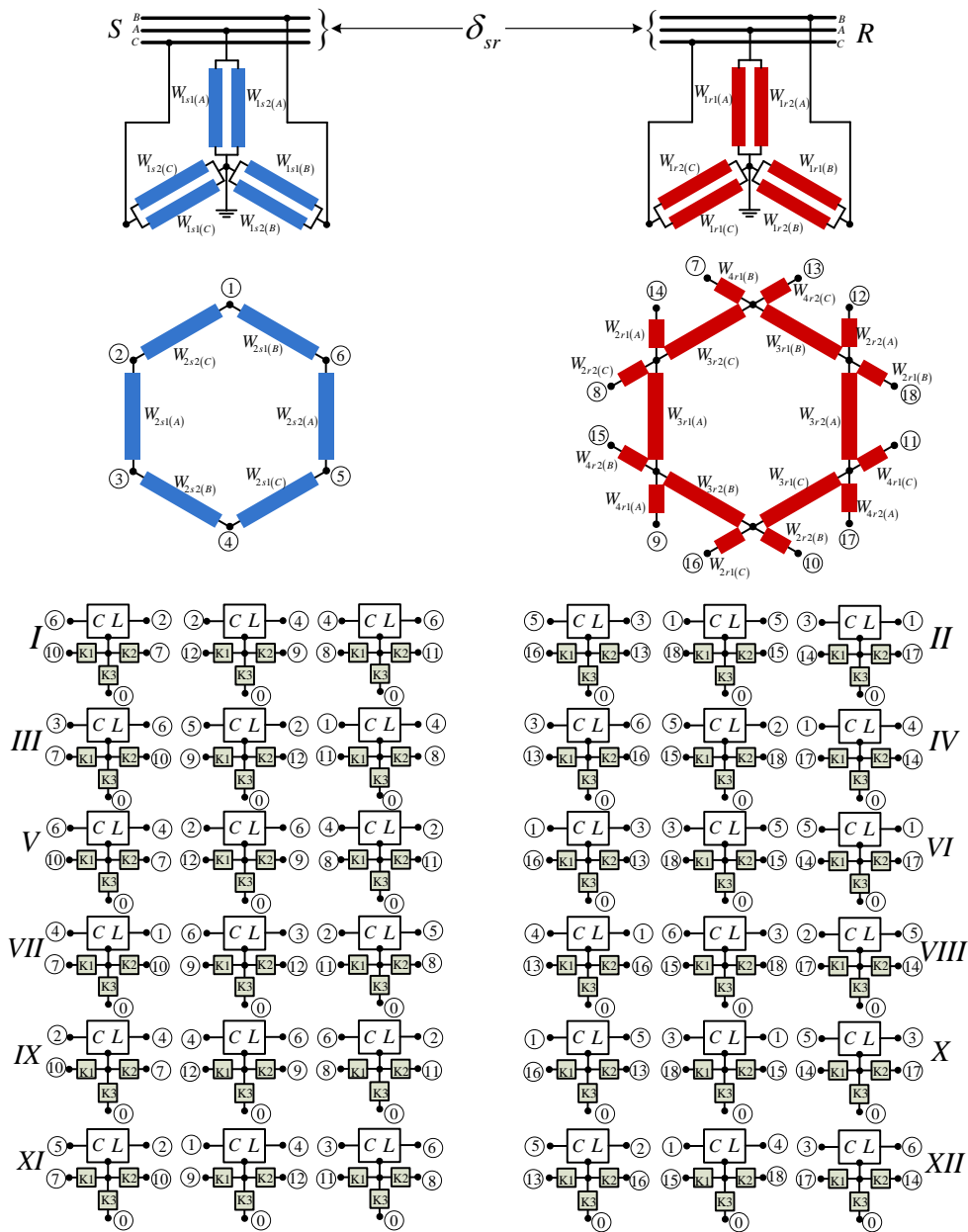


Рис.3.5 Электрическая схема предложенного технического решения

Из рисунка следует, что концевыми элементами схемы являются силовые трансформаторы, установленные на передающей (S) и приемной (R) подстанциях (узлах) энергетических систем, работающих в условиях произвольно изменяющегося угла мощности между напряжениями идентичных фаз соответствующих подстанций.

Первичные (высоковольтные) обмотки обоих трансформаторов подключены по схеме звезда. Вторичные (низковольтные) обмотки трансформаторов, расположенные на передающей стороне, соединены по схеме шестиугольника, а на приемной стороне, соединены по схеме шестиугольника с дополнительными ветвями, выходящими из его вершин. Количество витков указанных ветвей выбрано таким образом, чтобы напряжения на выводах каждой пары ветвей одной вершины были сдвинуты относительно друг друга по фазе на угол 15° .

В результате на низковольтной стороне приемного трансформатора появляются две системы трехфазного напряжения с определенным фиксированным фазовым сдвигом. Такой подход позволяет получить возможность создания двух независимо контролируемых параллельных каналов передачи мощности и получить дополнительную степень свободы при статическом и динамическом состоянии устройства.

Так же отличительной особенностью предложенной схемы преобразователя является то, что каждый канал формируется набором трехфазных блоков элементарных (CL) модулей, которые представлены на рис.3.5. Как видно из схемы, в этом случае имеется 12 трехфазных модулей. Элементы с числами в диапазоне 1-6 определяют соответствующие шестиугольные вершины низковольтных обмоток, связанных с трансформатором на передающей стороне. Узлы с одинаковыми номерами соединяются между собой, образуя комплексную схему устройства.

Каждый элементарный модуль оснащен собственной системой управления в виде силовых ключей, представленных на схеме рис.3.5 в виде квадратных элементов К1-К3. В этом случае переключатели, помеченные цифрами 1 и 2, выполняют основные управляющие действия. Переключатель, обозначенный цифрой 3, выполняет защитные и вспомогательные функции. Цифры в интервале 7-18, расположенные рядом с соответствующими электронными переключателями, указывают точки подключения к обмоткам низкого напряжения трансформатора на приемной стороне.

Все блоки элементарных модулей разделены на две отдельные группы. Блоки, отмеченные нечетными римскими цифрами, образуют первую группу. Блоки, отмеченные четными римскими цифрами, образуют вторую группу. Это разделение модулей на две

отдельные группы позволяет улучшить качество процесса преобразования, а также значительно повысить степень управляемости устройством. Сопряженные реактивные элементы трехфазных модулей обеих групп настраиваются в соответствии со значением стандартной частоты в передающей энергосистеме.

Характерной особенностью всех устройств, объединенных концепцией ИРС, является то, что наиболее опасный режим работы появляется при потере нагрузки, что приводит к резонансу токов в сопряженных реактивных элементах. Как показано ниже, третий силовой ключ, кроме обеспечения защиты от явлений резонанса токов, способствует улучшению качества преобразования в динамических режимах работы преобразователя в виде эффективного средства подавления субсинхронных колебаний (offset).

Функциональный принцип работы одного элементарного модуля рассмотрен на примере рис. 3.6. Как видно из схемы свободные концы сопряженных реактивных СL-элементов соединены с двумя вторичными напряжениями ($U_s e^{j\frac{\pi}{2}}$ и $U_s e^{-j\frac{\pi}{2}}$), которые сдвинуты на угол $\pm\pi/2$ относительно напряжения питания (U_s) за счет трансформаторов находящихся на передающей стороне.

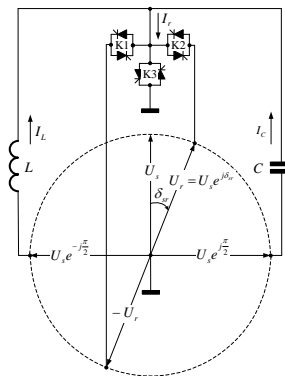


Рис. 3.6 Схема, поясняющая работу элементарного модуля

К средней точке сопряженных реактивных элементов подключены силовые ключи (К1 и К2) которые попеременно соединяются с противофазными напряжениями (U_r) или ($-U_r$) через вторичные обмотки трансформаторов на приемной стороне соединения. Таким образом, в условиях произвольно изменяющегося угла δ_{sr} , скоординированное управление ключами К1 и К2 обеспечивает возможность передачи мощности одним элементарным модулем в заданном направлении. Набор элементарных модулей, объединенных определенной логикой взаимодействия, позволяет решать задачи, связанные с управлением режимов работы исследуемого устройства.

Сущность процессов протекающих в одном модуле детально описана в пункте 2.2.

Характер изменения активной и реактивной мощности в зависимости от угла δ_{sr} иллюстрируется графиками, показанными на рис. 3.7. При рассмотрении данных графиков видно, что работа силовых ключей К1 и К2 происходит в момент нулевого значения передаваемой активной мощности, в то время как реактивная мощность достигает своего максимального значения. Так же следует отметить, что ключи К1 и К2 срабатывают дважды при изменении угла δ_{sr} в диапазоне $0^\circ \div 360^\circ$, а кратковременное включение силового ключа К3 в момент переключения ключей К1 и К2, позволит облегчить условия работы ключей при переключении.

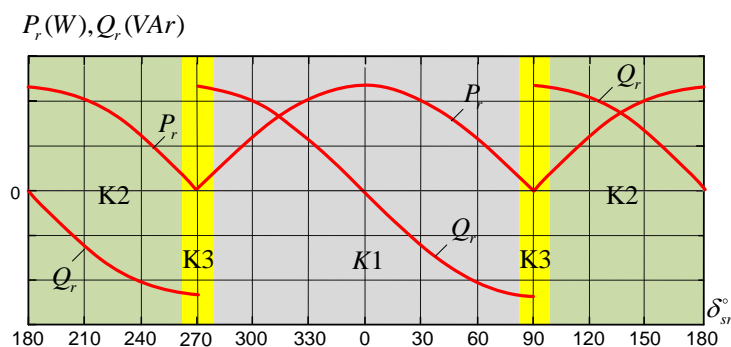


Рис.3.7 Изменение активной и реактивной мощности одного модуля

Элементарные модули, пронумерованные нечетными римскими цифрами, образуют один канал передачи мощности, а четными римскими цифрами – второй канал. Каждый из этих наборов содержит шесть трехфазных элементарных блоков. С помощью различных комбинаций соединения блоков обоих каналов с вершинами питающего шестиугольника между токами соседних блоков каждого канала устанавливается фазовый сдвиг $\pi/6$. Таким образом, результирующий ток на выходе каждого канала становится суммой шести сдвинутых на угол $\pi/6$ токов. Напряжения точек подключения одного и второго каналов к низковольтным обмоткам приемного трансформатора также взаимно сдвинуты по фазе на угол $\pi/6$. В результате совместного влияния всех вышеперечисленных условий существенно снижаются негативные последствия, вызванные действием силовых ключей.

Расчетные эксперименты, проведенные с помощью структурно-имитационной модели в соответствии с приведенной диаграммой переключений указанной в приложении А6 рис. А6.17, позволили получить полную картину, иллюстрирующую работу отдельных элементов преобразователя в статическом состоянии рис.3.8, а так же характеристики изменения активных и реактивных мощностей на вводах и выводах устройства в зависимости от угла δ_{sr} устройства в целом, рис. 3.9.

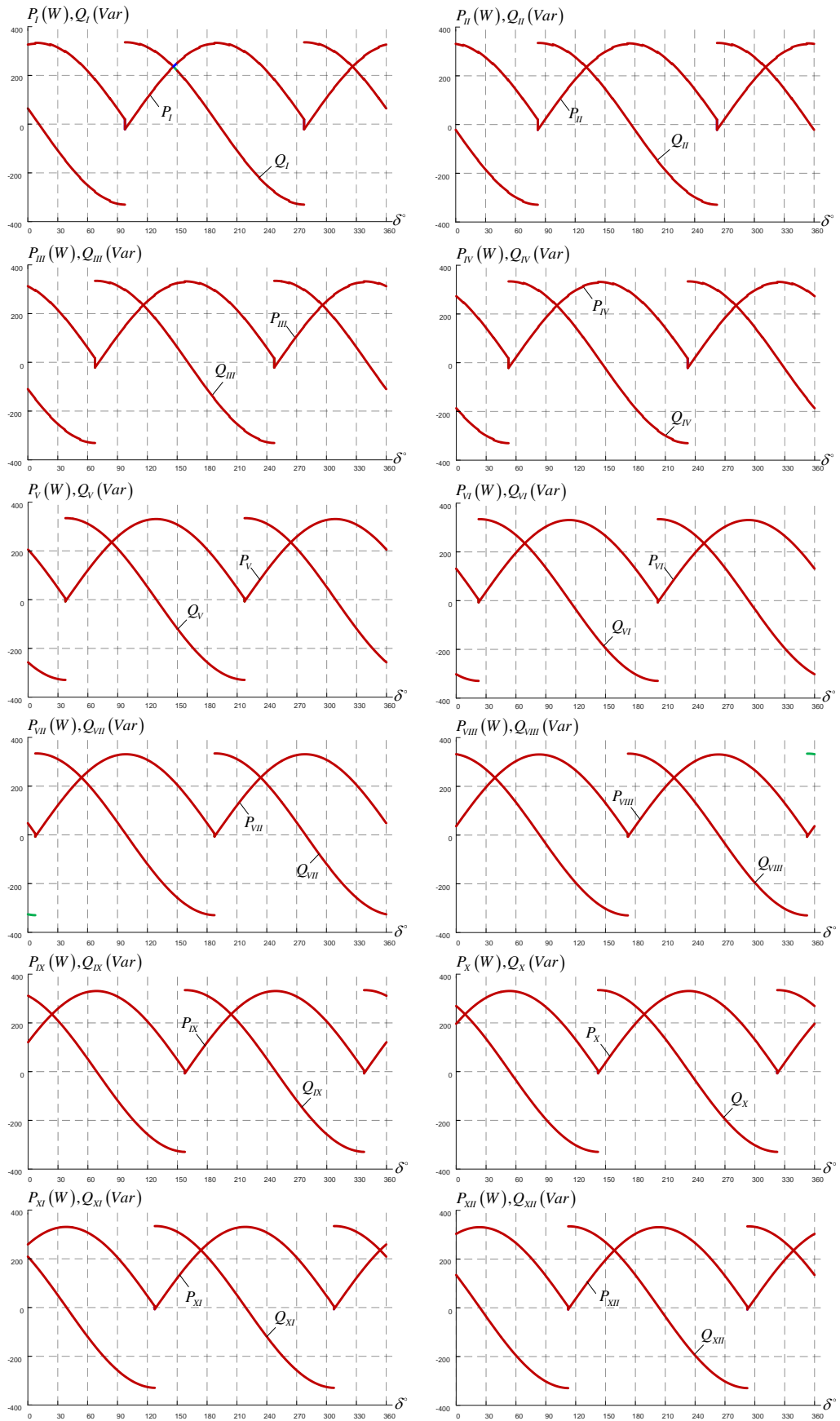


Рис.3.8 Статические характеристики каждого элементарного модуля

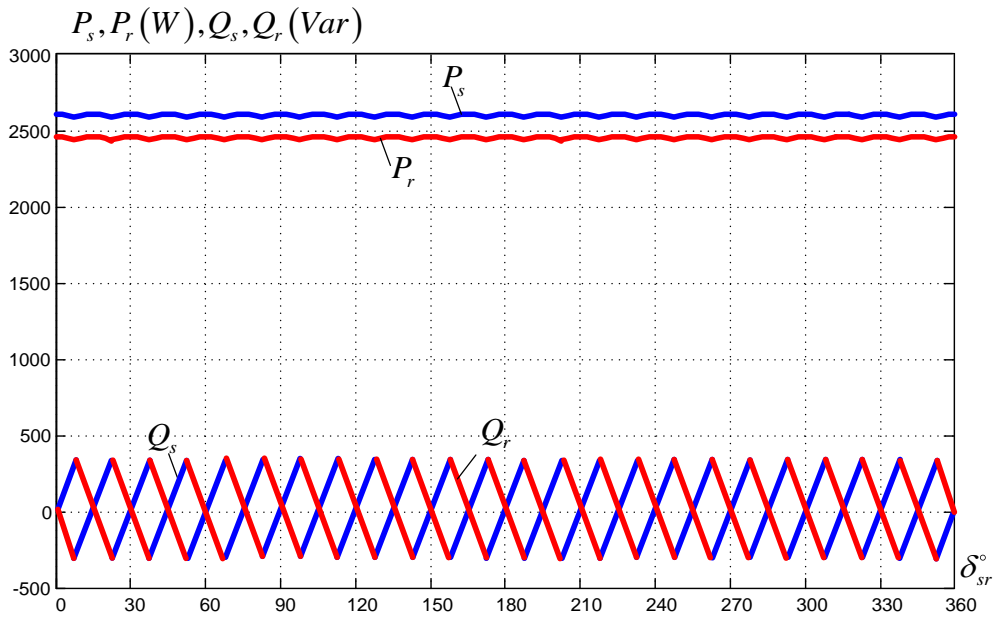


Рис.3.9 Статические характеристики мощности преобразователя

Графики, приведенные на рис. 3.9, показывают периодическое повторение формы кривых мощности, определяющих качество процесса обмена энергией между электрическими системами. В этом случае полный диапазон ($0^\circ \div 360^\circ$) изменения угла делится на 24 равных участка (по 15° каждый), в пределах которых наблюдается сходство электрических процессов. Точки разрыва характеристик активной (P_s, P_r) и реактивной (Q_s, Q_r) мощности соответствуют срабатыванию силовых ключей соответствующих блоков элементарных модулей. Отдельно следует отметить высокую степень устойчивости уровня передаваемой активной мощности P при достаточно низком абсолютном значении реактивной мощности Q , сопровождающей процесс преобразования. Между активной мощностью P_s и P_r прослеживается разница, обусловленная потерями активной мощности в устройстве.

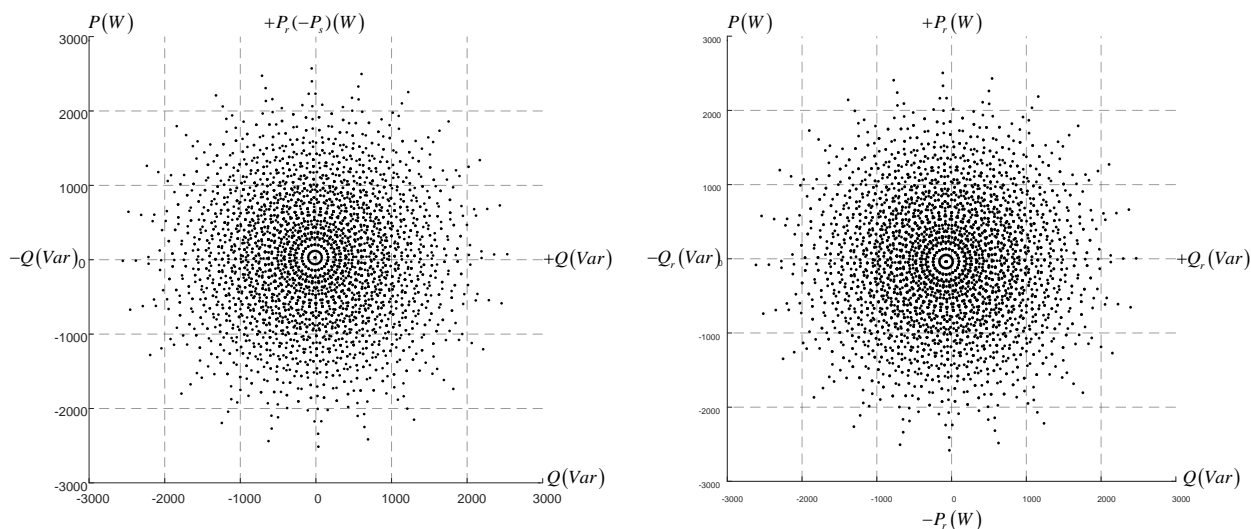
Результаты имитационного моделирования показали, что предложенная схема FACTS контроллера имеет очень широкие возможности для регулирования уровня передаваемой активной и реактивной мощности, как по величине, так и по направлению. Эта функция контроллера остается неизменной при любом значении фазового угла δ_{sr} .

Область существования режимов передачи мощности устройством при асимметричном управлении и фазовом сдвиге 15° значительно расширилась.

Применение двух силовых ключей, на одном элементарном модуле, и их асимметричное управление способствует увеличению количества неповторяющихся режимов ра-

боты устройства в 6,5 раз, а именно до 2403 комбинации из 4096 возможных, приведенных на PQ диаграммах рис. 3.10.

Так же необходимо отметить, что 2403 неповторяющиеся комбинации разбиваются на 70 групп в зависимости от уровня передаваемой мощности при динамическом состоянии преобразователя и находятся в диапазоне $\pm 100\%$ от установленной мощности устройства, позволяющие обеспечить УМС переменного тока.



а) на модулях
б) на приемной системе
Рис. 3.10 Область возможных значений передаваемых мощностей.

Выполненная модернизация преобразовательного устройства и асимметричное управление силовыми ключами позволили снизить сопровождающую реактивную мощность при коммутации ключей в два раза. Дальнейшее снижение сопровождающей реактивной мощности осуществляется кратковременным включением ключа К3 на землю, рис. 3.6.

Ввод ключа К3 в схему устройства влечет за собой существенное увеличение уровня передачи мощности устройством. Результатом введения в схему ключа К3 стало получение 531 441 неповторяющейся комбинации включения ключей. Область оригинальных значений передаваемых мощностей устройством представлена на рис. 3.11 и составляет 341 097 уровней, поскольку 190 344 комбинации включения дублируют уже существующие значения передаваемой мощности. Результаты выполненных расчетов в данной работе не приводятся по причине большого объема. Определение количества неповторяющихся комбинаций было выполнено в Microsoft Office Excel, а определение уровня и неповторяющихся значений передаваемой мощности в Microsoft Office Access.

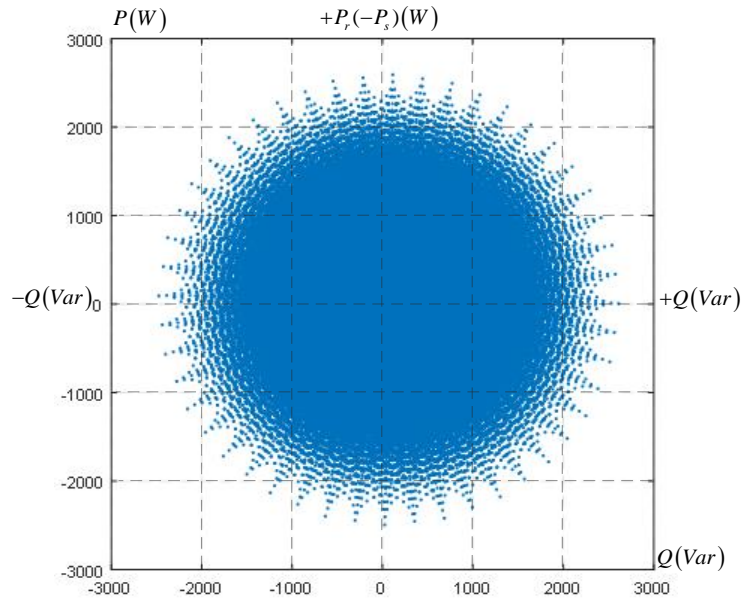


Рис.3.11 Область возможных значений передаваемых мощностей при включении ключа К3

Как видно из рис.3.11, применение ключа К3 позволяет обеспечить высокую степень заполнения области существования режимов работы преобразователя по передаче мощности. Это свидетельствует о том, что с помощью предложенной схемы преобразователя и стратегии управления можно обеспечить плавное регулирования режима УМС, созданной на ее основе.

3.3 Анализ возможности улучшения качества преобразований на основе модернизированного варианта схемы устройства

Анализ предлагаемого варианта схемы устройства выполнялся при организации УМС двух асинхронно работающих энергосистем с разными стандартами по поддержанию частоты [76].

В качестве примера рассмотрена ситуация, в которой передающая система работает с частотой 60 Гц, а принимающая – 59,8 Гц. Указанная разность частот между системами в соответствии с действующими правилами определяет границу, после которой необходимо выполнить меры по частотному регулированию.

На первом этапе поставленная задача решалась без применения гармонических фильтров и демпферов, которые помогают устранить искажения во время работы устройства. На втором этапе исследования для улучшения качества преобразования были применены фильтры.

Стратегия управления силовыми ключами сводится к определению скорости сдвига угла δ_{sr} в соответствии с заданной частотой скольжения, а так же к вычислению мо-

ментов времени срабатывания для каждого ключа при реализации операций переключений на модели.

Ранее при рассмотрении графиков, представленных на рис.3.9, было отмечено, что условия работы переключателей К1 и К2 следует считать весьма неблагоприятными в результате резкого изменения реактивной мощности от одного максимального значения до другого противоположного максимального значения. В этой связи, для уменьшения величины бросков реактивной мощности, было принято решение о кратковременном включении ключа К3 во время переключений ключей К1 – К2 или К2 – К1, рис. 3.7. Такое действие может позволить уменьшить уровень бросков реактивной мощности при операциях переключений, а так же оказать положительное влияние на качество процесса преобразования.

Для обоснования выше сказанного были исследованы три режима работы преобразователя при различном времени включения ключа К3. Осциллограммы, полученные в процессе структурно – имитационного моделирования процесса преобразования для трех вариантов времени включения ключа К3 приведены на рис.3.12 – 3.14.

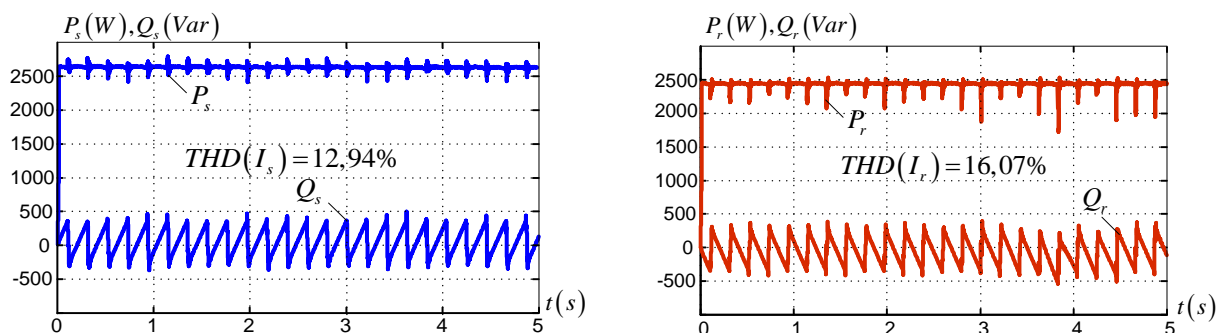


Рис.3.12 Режим преобразования управляется прямым обменом энергией между ключами К1 и К2 без кратковременного включения ключа К3.

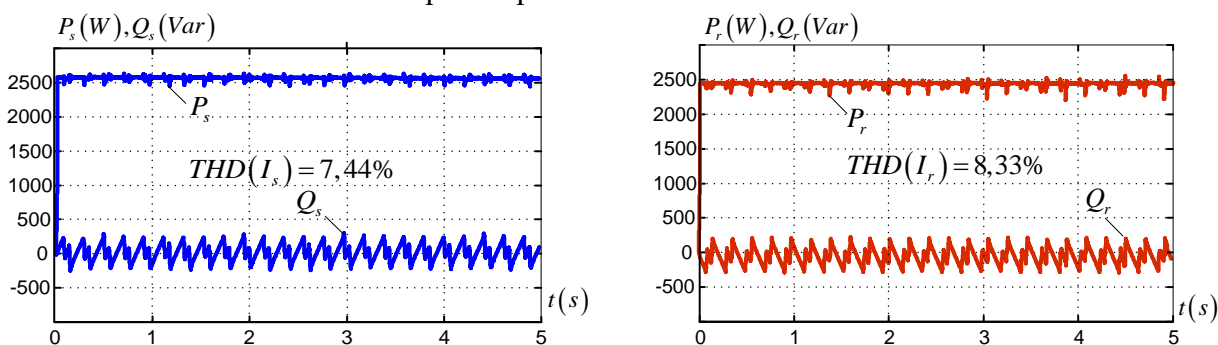


Рис.3.13 Режим преобразования с кратковременным включением ключа К3 длительностью $\tau = 0,055556$ секунд.

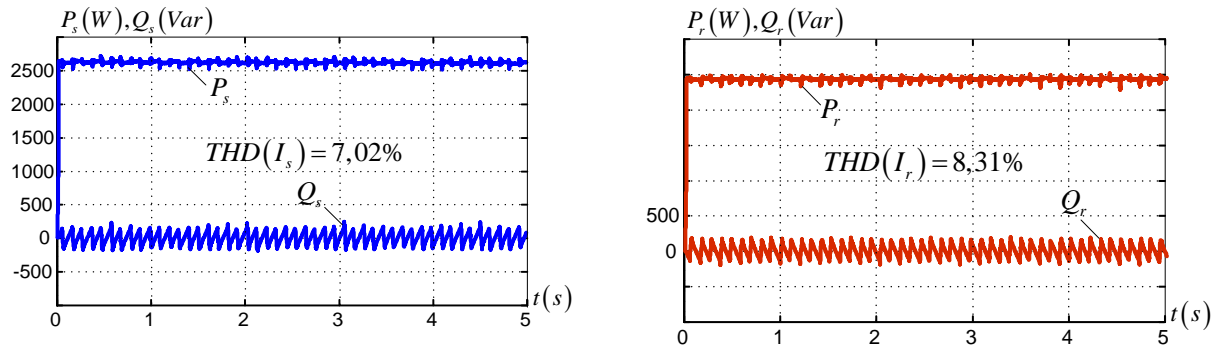


Рис.3.14 Режим преобразования с кратковременным включением ключа К3 длительностью $\tau = 0,111111$ секунд.

Первым режимом работы является режим преобразования, который контролируется прямым обменом энергии между ключами К1 и К2 без кратковременного включения ключа К3, рис. 3.12. Этот режим характеризуется довольно высоким показателем коэффициента гармонических искажений токов нагрузки передающей $THD(I_s) = 12,94\%$ и принимающей $THD(I_r) = 16,07\%$ систем.

Кроме того, характеристика активной мощности принимающей стороны $P_r(t)$ содержит значительные искажения в виде стробов, совпадающие по времени с реверсом реактивной мощности $Q_r(t)$. Характер изменения реактивной мощности в течение расчетного интервала времени указывает на наличие субсинхронных колебаний вызванных явлением, которое называется «offset».

Вторым режимом работы является режим преобразования с кратковременным включением ключа К3 длительностью $\tau = 0,055556$ с., рис. 3.13.

Длительность кратковременного включения ключа К3 при заданном скольжении 0,2 Гц соответствует $\tau = 0,055556$ с. или изменению угла δ_{sr} на 4° . В этом случае силовой ключ К3 посредством заземления выходного тока коммутируемого модуля ослабляет выброс реактивной мощности при ее реверсировании. В результате на форме кривой $Q_r(t)$ появляются дополнительные провалы, приводящие к выравниванию операций «заряд-разряд» для сопряженных СL-элементов. Кроме того, наблюдается заметное уменьшение субсинхронных колебаний в процессе работы преобразователя. При этом осциллограммы указывают на лучшую стабилизацию уровней активной мощности, как на входе $P_s(t)$, так и на выходе $P_r(t)$ исследуемого устройства. Коэффициент гармонического ис-

кажения токов нагрузки на соответствующих сторонах преобразователя характеризуется значениями $THD(I_s) = 7,44\%$ и $THD(I_r) = 8,33\%$.

Третьим режимом работы является режим преобразования с кратковременным включением ключа КЗ длительностью $\tau = 0,111111$ с., рис. 3.14.

Интервал кратковременного включения соответствует изменению угла δ_{sr} (в течение $\tau = 0,111111$ с.) на 8° . Включения ключа КЗ приводит к дополнительному двойному уменьшению диапазона броска реактивной мощности и улучшению коэффициента гармонических искажений.

По результатам анализа первого этапа можно сделать вывод о том, что третий режим можно рассматривать как наилучший результат работы статического преобразователя частоты на основе источников неизменного тока без применения фильтрокомпенсирующих устройств.

В соответствии с Международным стандартом IEEE-519 допустимое значение полного гармонического искажения (THD) синусоидальной формы рабочего тока в транспортных сетях электроэнергетических систем нормируется в зависимости от отношения тока короткого замыкания на шинах подстанции энергосистемы (I_{SC}) к току короткого замыкания (I_L) ветви, которая является источником искажения. При условии $I_{SC}/I_L = 20 \div 50$, допустимый коэффициент гармонических искажений величины рабочего тока этой ветви определяется значением $THD \leq 8\%$, рис. 3.15 – 3.16.

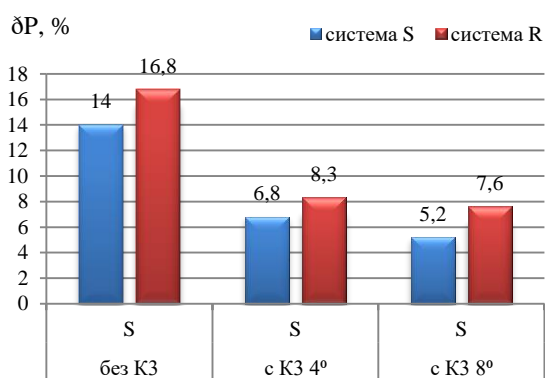


Рис. 3.15 Гистограмма степеней стабильности передаваемой мощности на передающей и приемной системах при работе устройства на активную нагрузку

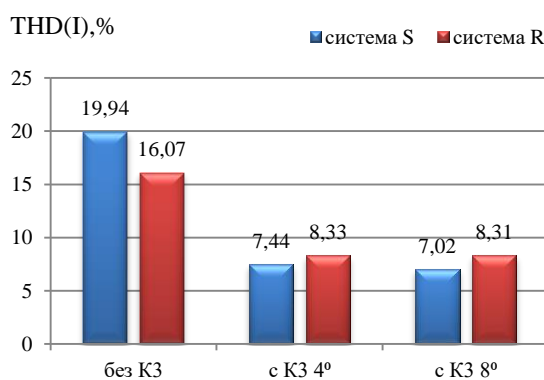


Рис. 3.16 Гистограмма коэффициентов гармонических искажений тока на передающей и приемной системах при работе устройства на активную нагрузку

Как следует из проведенного анализа третьего режима ($\tau = 0,111111$ с.), коэффициент гармонических искажений на передающей и приемной системах характеризуется ве-

личинами $THD(I_s) = 7,02\%$ и $THD(I_r) = 8,31\%$ соответственно. Этот результат довольно близок к требованиям стандарта IEEE-519 и дальнейшее улучшение качества преобразования статическим преобразователем на основе источников неизменного тока осуществляется применением гармонических фильтров и демпферов.

Вторым этапом исследования улучшения качества преобразования было применение гармонических фильтров и демпферов. Осциллограммы токов на передающей и приемной системе, иллюстрирующие эффект применения гармонических фильтров и демпферов при работе устройства на основе источников неизменного тока приведены на рис.3.17. Анализ осциллограмм рис.3.17 показывает, что применение фильтров, подключенных к вершинам многоугольника передающей системы, существенно улучшает форму кривых тока как на передающих, так и на приемных шинах.

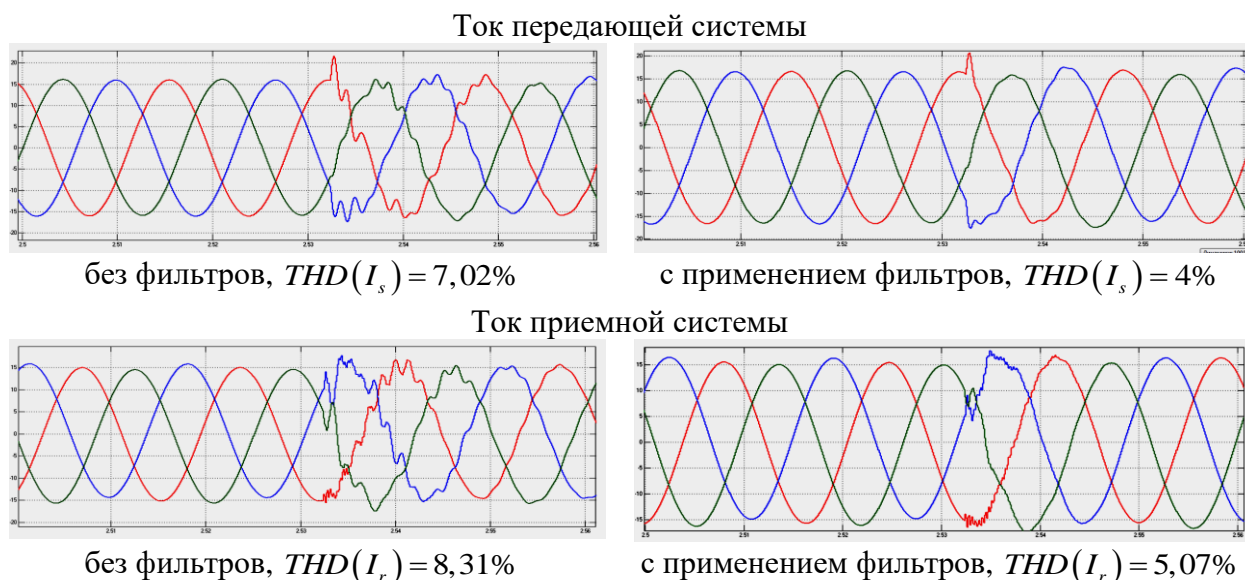


Рис.3.17 Осциллограммы токов на передающей и приемной системах, до и после применения фильтров

Таким образом, коэффициент гармонических искажений тока, при кратковременном включении ключа КЗ длительностью $\tau = 0,111111$ с. и включением соответствующих фильтров, удастся снизить на передающей системе с $THD(I_s) = 7,02\%$ до $THD(I_s) = 4\%$, а на приемной системе с $THD(I_r) = 8,31\%$ до $THD(I_r) = 5,07\%$.

Полученные значения коэффициента гармонических искажений тока, на передающей и приемной системах, удовлетворяют требованиям стандарта IEEE-519.

Выводы по третьей главе

1. В итоге выполненного исследования подтверждено, что структурно - имитационная и математическая модель в равной степени иллюстрируют режимные характеристики устройства и его элементов. Таким образом доказано, что математическая модель

устройства может быть применена для определения и анализа характеристик устройств такого типа.

2. Модернизация схемы и асимметричное управление силовыми ключами позволили добиться практически линейного уровня передачи активной мощности и способствовали снижению бросков реактивной мощности при коммутации силовых ключей в два раза. Введение в схему ключа КЗ обеспечило защиту устройства от явлений резонанса токов и позволило улучшить качество преобразования, что способствовало плавному управлению устройством за счет расширения области существования режимов его работы.

3. Динамический режим работы модернизированной схемы устройства свидетельствует о преимуществе применения ключа КЗ не только в области улучшения качества преобразования и дополнительному двойному уменьшению диапазона броска реактивной мощности, но и в части снижения субсинхронных колебаний именуемых как «offset». Так же следует отметить, что применение гармонических фильтров и демпферов позволило улучшить коэффициент гармонических искажений на передающей системе с 7,02% до 4%, а на приемной системе с 8,31% до 5,07%. Полученные значения удовлетворяют требованиям стандарта IEEE-519.

4. Представленный статический преобразователь на основе источников неизменного тока обеспечивает широкий диапазон управляемости путем деления сопряженных проводимостей основных реактивных элементов на элементарные модули. Законы управления элементарными модулями позволяют обеспечить синхронную УМС переменного тока двух синхронно работающих систем с разными стандартами по поддержанию частоты.

4. УПРАВЛЯЕМАЯ МЕЖСИСТЕМНАЯ СВЯЗЬ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЫПОЛНЕННОГО ПО СХЕМЕ «ЗИГЗАГ»

4.1 Принципиальная схема и принцип работы устройства

В данной части работы предложен вариант схемы статического двухканального преобразователя частоты выполненного по схеме «зигзаг», который может быть принят в качестве рабочей модели для реализации принципа прямого преобразования частоты [13], не связанного с двойным преобразованием энергии и не имеющего недостатков, свойственных VFT.

Схема исследуемого двухканального статического преобразователя частоты представлена на рис.4.1.

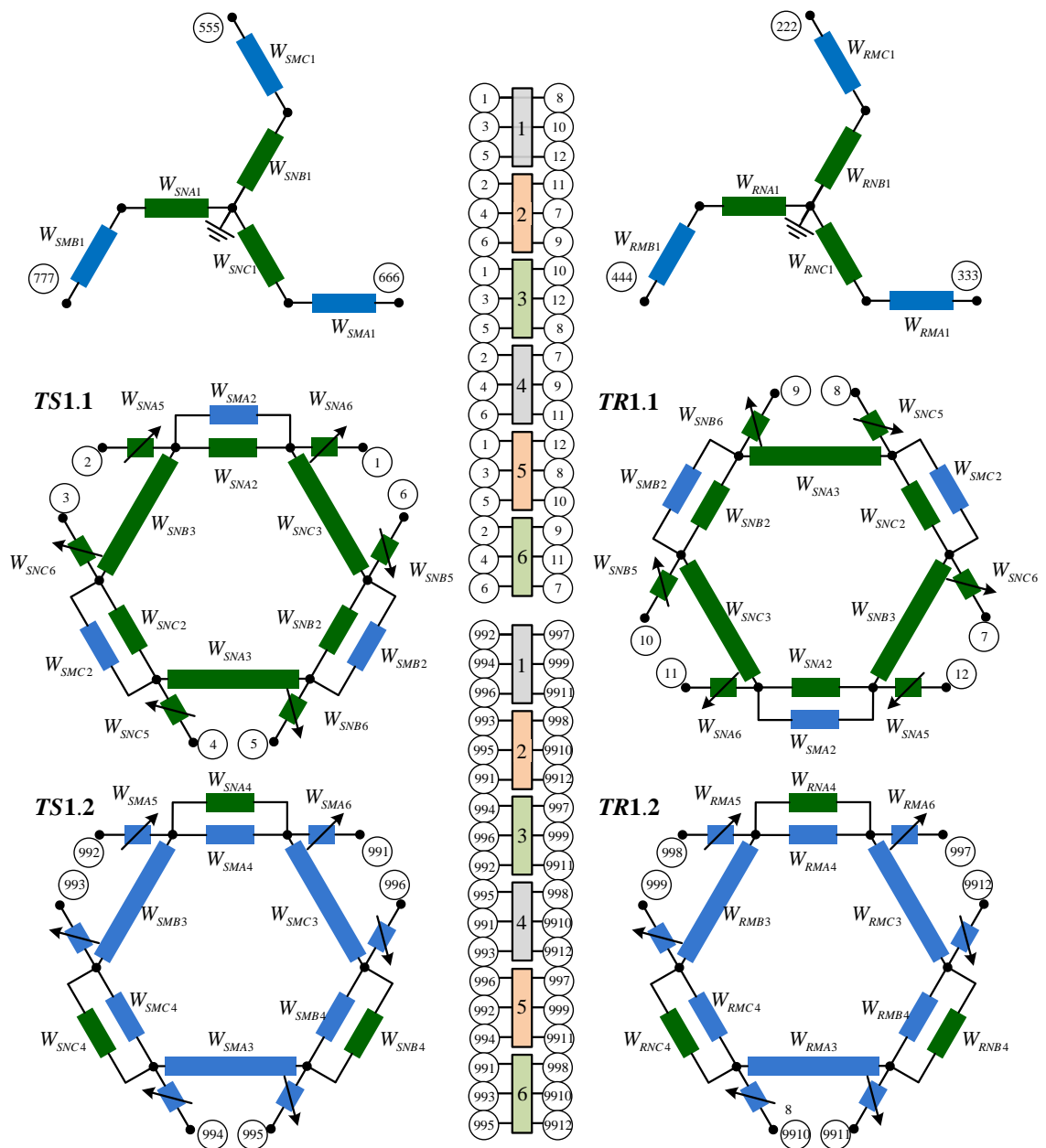


Рис.4.1 Схема двухканального статического преобразователя частоты по схеме «зигзаг».

Каждый канал предложенного варианта схемы статического преобразователя частоты состоит из многообмоточных однофазных трансформаторных групп SN и SM на передающей стороне и RN и RM на приемной стороне, первичные обмотки, которых соединены по схеме «зигзаг» с целью подавления 3 гармоника тока. Нерегулируемые вторичные обмотки трансформаторных устройств, соединены по схеме «шестиугольник», к вершинам которых подключены соответствующие обмотки управления, представляющие собой блок «тонкого» регулирования. Ключи 1-6 представляют собой блок «грубого» регулирования.

Предложенный вариант преобразователя позволяет осуществлять круговое вращение вектора выходного напряжения относительно входного, тем самым обеспечивая УМС переменного тока между двумя асинхронно работающими энергосистемами. Процесс кругового вращения фазы осуществляется на базе статических трансформаторных устройств посредством изменения числа витков вольтодобавочных обмоток и подчиняется математически доказанному в пункте 2.3 принципу обосновывающему возможность построения устройств такого рода.

Вектор вольтодобавочного напряжения расположен под углом 90° относительно вектора фазного напряжения сети, и обеспечивает фазовый сдвиг по напряжению в диапазоне:

$$\pm\psi = \arctg\left(\frac{U_n}{3 \cdot U_\phi}\right) = \pm 30^\circ \quad 4.1$$

где

U_n - линейное напряжение;

U_ϕ - фазное напряжение.

Из выражения 4.1 следует, что полный фазовый сдвиг по напряжению составляет 60° и обеспечивается работой блока «тонкого» управления. Следовательно, при разделении одного периода согласования, получается шесть секторов с прямолинейными участками, описывающими окружность. Соответственно для обеспечения кругового вращения фазы напряжения через каждые 60° должно происходить переключение ключей «грубого» управления.

Исследуемое устройство, рис. 4.1, состоит из четырех связанных между собой трансформаторных устройств, обозначенных TS1.1, TS1.2, TR1.1, TR1.2 и условно разделено на два канала. Сектора, в которых работают каналы устройства, пронумерованы рим-

скими цифрами. Первый канал состоит из трансформаторных устройств TS1.1 и TR1.1, которые развернуты друг относительно друга на угол 60° . Второй канал состоит из TS1.2, TR1.2, не сдвинутых друг относительно друга. Векторная диаграмма напряжений трансформаторных устройств в исходном состоянии представлена на рис. 4.2.

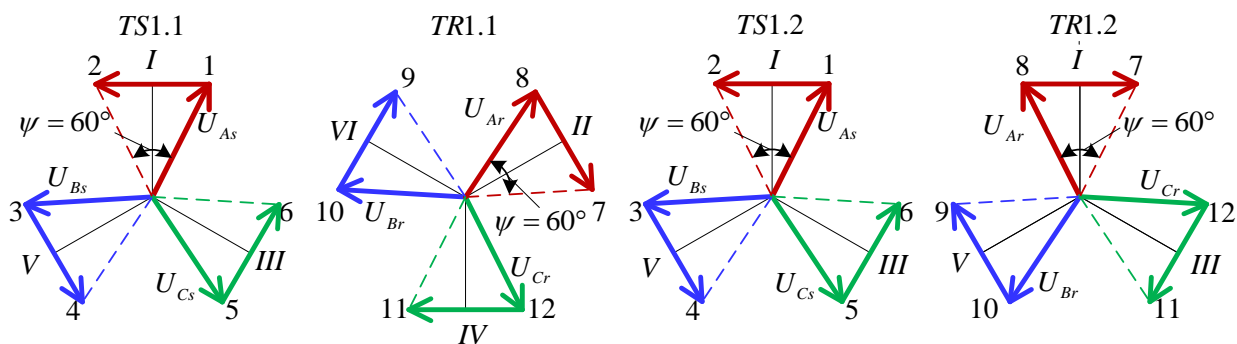


Рис. 4.2 Векторная диаграмма напряжений в исходном состоянии

В исходном состоянии входное напряжение U_{As} и выходное напряжение U_{Ar} сдвинуты по фазе на угол 30° , благодаря тому, что первичные обмотки устройства соединены по схеме зигзаг, а обмотки «тонкого» управления со стороны входа и выхода полностью введены в схему устройства. Такое исходное состояние задает направление передаваемой мощности.

Процесс кругового вращения фазы выходного напряжения относительно входного рассмотрим на примере фазы «А». Изменение угла фазового сдвига между выходным и входным напряжением определяется способом секционирования и положением ключей блока «тонкого» управления. Круговое вращение фазы начинается с вывода из работы обмоток блока «тонкого» управления второго канала устройства, обеспечивая 60° сдвиг по фазе между выходным и входным напряжением (сектор I – TS1.2, TR1.2). По окончании процесса «тонкого» регулирования во втором канале, срабатывают ключи «грубого» регулирования обоих каналов. В результате второй канал отключается и в работу вводится первый канал (сектор II – TS1.1, TR1.1). После ввода в работу первого канала отрабатывает «тонкое» регулирование, которое обеспечивает дальнейший сдвиг по фазе между выходным и входным напряжением на угол 60° . Результатом работы устройства в I и II секторах, является обеспечение 120° фазового сдвига между входным и выходным напряжением.

Дальнейшая поочередная работа каждого из каналов устройства, ключей «грубого» и блока «тонкого» управления обеспечивает поворот напряжения фазы «А» от сектора к сектору. Векторная диаграмма напряжений, иллюстрирующая работу устройства за один оборот, представлена на рис.4.3.

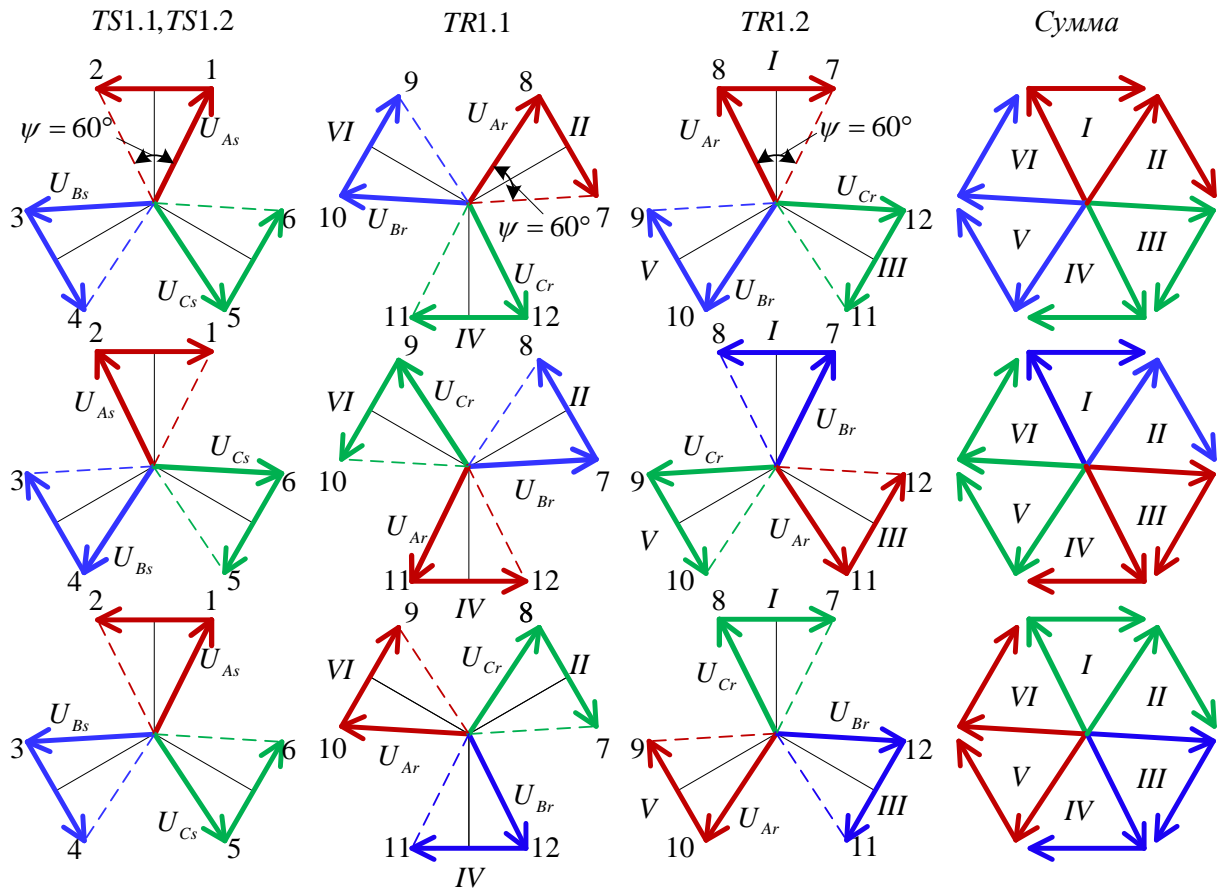


Рис. 4.3 Векторная диаграмма работы устройства в процессе одного оборота фазы напряжения

Из анализа векторной диаграммы представленной на рис. 4.3 видно, что в процессе согласования по частоте вектор выходного напряжения на трансформаторах TR1.1 и TR1.2 совершает один оборот относительно своего исходного состояния, а вектор входного напряжения на TS1.1 и TS1.2 развернулся на угол 180° .

Из вышеизложенного следует, что процесс согласования частоты на данном этапе нельзя считать завершенным, так как вектор напряжения со стороны питающей системы не выполнил полный оборот, следовательно, процесс вращения фазы выходного напряжения относительно входного напряжения на трансформаторах TR1.1 и TR1.2 следует повторить для обеспечения завершения процесса согласования. Векторная диаграмма

напряжений полного цикла частотного преобразования с переключением ключей «грубо-го» управлением через 120° приведена на рис. 4.4.

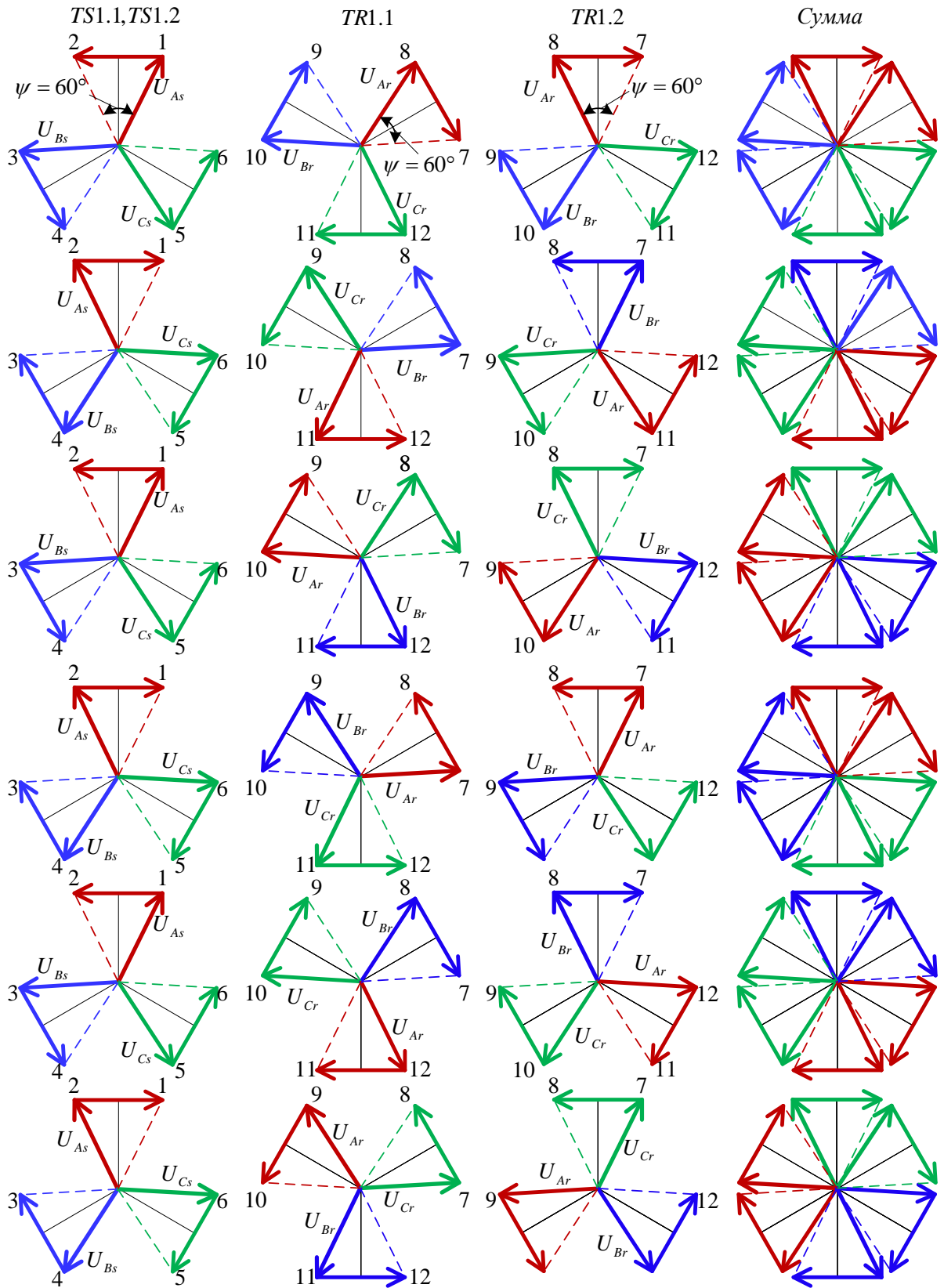


Рис. 4.4 Векторные диаграммы, поясняющие стратегию «грубого» регулирования

Закон управления силовыми ключами «грубого» регулирования представлен на рис. 4.5.

S1	\mathcal{N}_p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
S2	\mathcal{N}_p	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25
S3	\mathcal{N}_p	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
S4	\mathcal{N}_p	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73
S5	\mathcal{N}_p	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
S6	\mathcal{N}_p	144	143	142	141	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131	130	129	128	127	126	125	124	123	122	121

Рис. 4.5 Закон управления силовыми ключами «грубого» регулирования

Как отмечалось выше, блок «тонкого» регулирования представляет собой секционированные соответствующим способом обмотки управления статического преобразователя, переключаемые силовыми ключами.

Для исследования режимов работы преобразователя частоты разработаны два варианта секционирования регулировочных обмоток и законов их управления:

1. Закон управления блоком «тонкого» регулирования с 24 позиционным секционированием. Дискретность шага переключения составляет 5° . Схема секционирования и закон управления обмоткой блока «тонкого» регулирования представлены на рис. 4.6 и 4.7 соответственно.

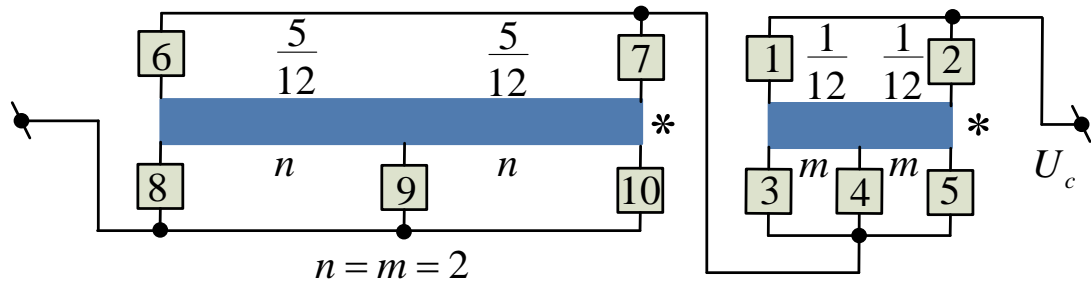


Рис. 4.6 Схема секционирования обмотки управления на 24 позиции переключения

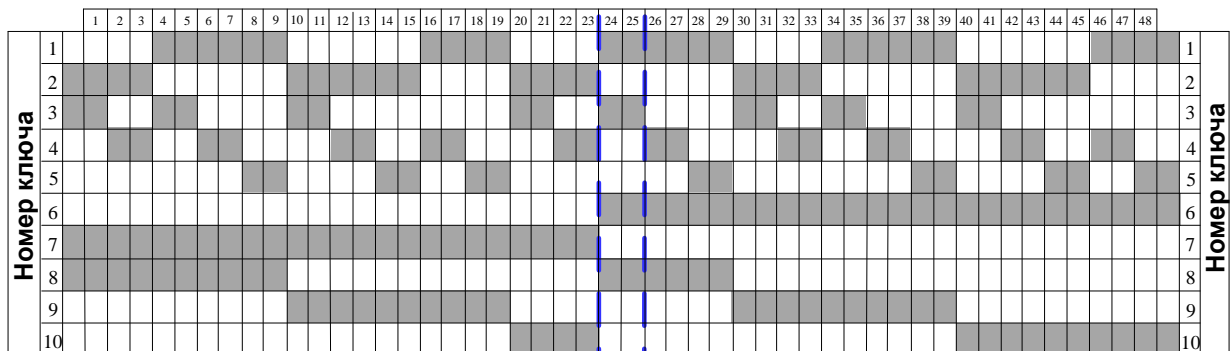


Рис. 4.7 Закон управления блоком «тонкого» регулирования с дискретностью ступени 5°

2. Закон управления блоком «тонкого» регулирования с 48 позиционным секционированием. Шаг переключения в этом случае составляет $2,5^\circ$. Схема секционирования

ния и закон управления обмоткой блока «тонкого» регулирования представлены на рис. 4.8 и 4.9 соответственно.

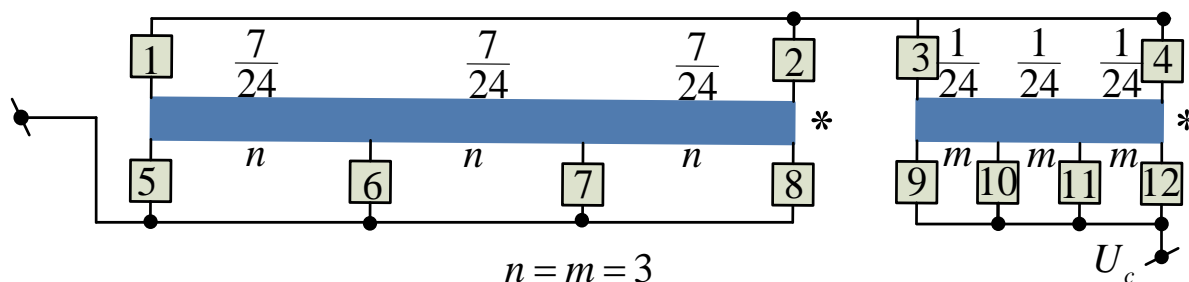


Рис. 4.8 Схема секционирования обмотки управления на 48 позиций переключения

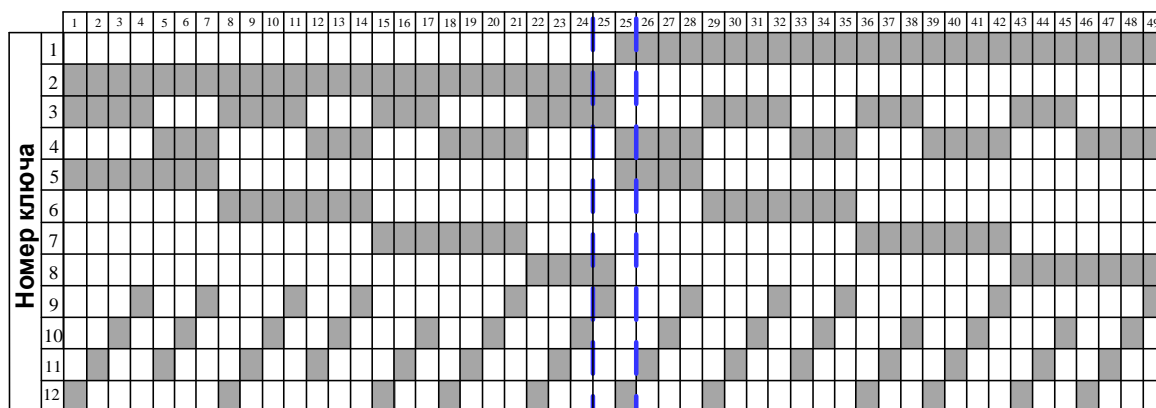


Рис. 4.9 Закон управления блоком «тонкого» регулирования с дискретностью ступени $2,5^\circ$

Преимущество разработанных схем секционирования обмоток управления по сравнению с традиционной заключается в том, что в процессе регулирования количество последовательно включенных ключей в работе всегда остается равным 4-м вне зависимости от позиции переключения, что существенно улучшает показатели надежности

Для предложенных схем управления справедливы следующие выражения:

- Максимальная степень дискретности обмотки управления - n ;
- Минимальная степень дискретности обмотки управления - m ;
- Напряжение обмотки управления;

$$U_c = mU_m + nU_n \quad 4.2$$

- Напряжение секции минимальной дискретности обмотки управления;

$$U_m = \frac{U_c}{m + n(1 + 2m)} = \frac{U_c}{p} \quad 4.3$$

- Напряжение секции максимальной дискретности обмотки управления;

$$U_n = (1 + 2m)U_m \quad 4.4$$

- Полное количество ступеней регулирования.

$$q = 1 + 2[m + n(1 + 2m)]$$

4.5

4.2 Режимы двухканального преобразователя частоты выполненного по схеме «зигзаг»

Для исследования режимов двухканального преобразователя частоты выполненного по схеме «зигзаг», был выполнен ряд вычислительных экспериментов:

- работа преобразователя на активную нагрузку;
- работа преобразователя на активную нагрузку через 30° ЛЭП;
- работа преобразователя на приемную систему через 30° ЛЭП.

Вычислительные эксперименты проводились на основе структурно-имитационных моделей при соблюдении следующих условий:

- расчетное время моделирования $t = 2$ секунды;
 - напряжение приемной и передающей систем $U_s = U_r = 230V$;
 - значение угла передающей системы $\delta_s = 0^\circ$;
 - положительным, принято направление передачи мощности от передающей (S) энергосистемы к приемной (R) ;
 - величина передаваемой мощности соответствовала номинальной мощности устройства;
 - ток на выходе устройства для всех расчетных экспериментов поддерживался на уровне $I_r = 24A \pm 10\%$, что соответствует номинальному значению;
 - значение угла передачи изменялось на стороне приемной системы за счет корректировки, с отрицательным знаком, в пределах $\delta_{sr} = 0^\circ \div -60^\circ$;
 - соотношение частот передающей и приемной систем приняты следующими: 60-50 Гц, 50-60 Гц, 50-49Гц, 50-49,6 Гц;
 - в зависимости от условий вычислительного эксперимента соотношение мощностей передающей и приемной систем составляло: 1:1; 1:10; 1:100; 1:1000;
 - параметры структурно-имитационной модели двухканального преобразователя частоты приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя:
- $U_{SM1} = U_{SN1} = U_{RM1} = U_{RN1} = 133 V$;
 - $I_{SM1} = I_{SN1} = I_{RM1} = I_{RN1} = 24A$;
 - $U_{SM2} = U_{SN2} = U_{RM2} = U_{RN2} = 345 V$;

- $I_{SM2} = I_{SN2} = I_{RM2} = I_{RN2} = 7 \text{ A}$;
- $U_{SM3} = U_{SN3} = U_{RM3} = U_{RN3} = 345 \text{ V}$;
- $I_{SM3} = I_{SN3} = I_{RM3} = I_{RN3} = 7 \text{ A}$;
- $U_{SM4} = U_{SN4} = U_{RM4} = U_{RN4} = 57,5 \text{ V}$;
- $I_{SM4} = I_{SN4} = I_{RM4} = I_{RN4} = 12 \text{ A}$;
- $U_{SM5} = U_{SN5} = U_{RM5} = U_{RN5} = 57,5 \text{ V}$;
- $I_{SM5} = I_{SN5} = I_{RM5} = I_{RN5} = 12 \text{ A}$.

Для оценки качества преобразования частоты и передачи мощности применялись следующие режимные параметры:

- степень стабильности 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.

Эксперимент по питанию активной нагрузки через исследуемый преобразователь частоты осуществлялся в соответствии со схемами, приведенными рис. 4.10, 4.11.

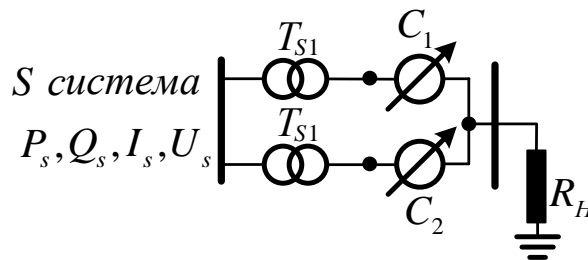


Рис. 4.10 Схема работы преобразователя на активную нагрузку

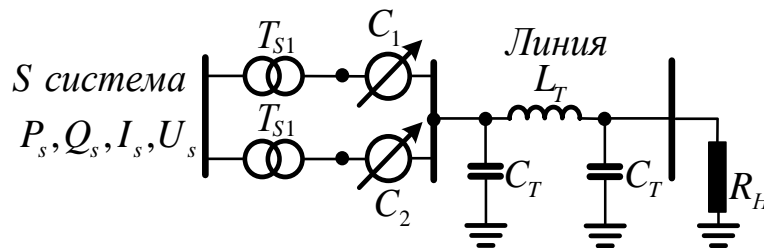
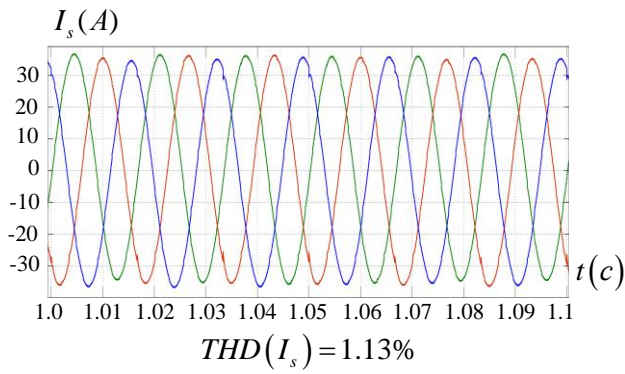
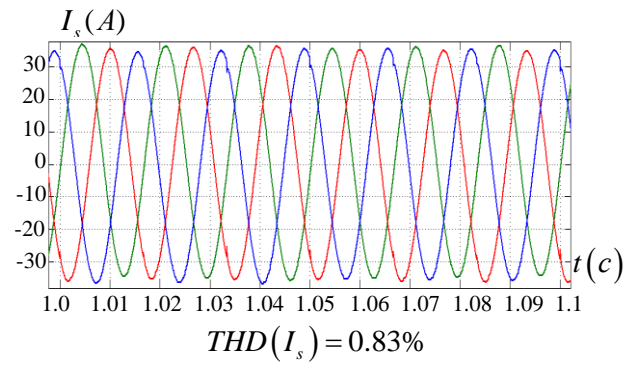


Рис. 4.11 Схема работы преобразователя на активную нагрузку через ЛЭП 30°

Результаты расчетных экспериментов приведены в виде осциллограмм представленных на рис. 4.12-4.15 для соотношения частот приемной и передающей систем 60 - 50 Гц. Результаты при использовании 24 позиционного регулирования обозначены буквой «а», для 48 – и позиционного буквой «б» соответственно.

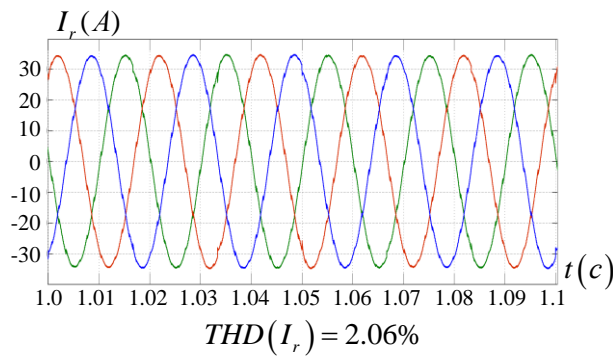


а

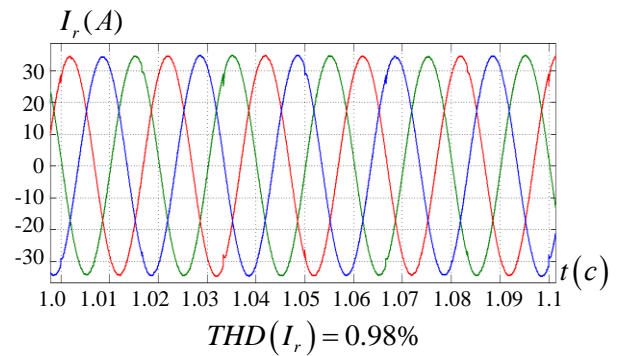


б

Рис. 4.12 Осциллограммы токов на передающей I_s системе.

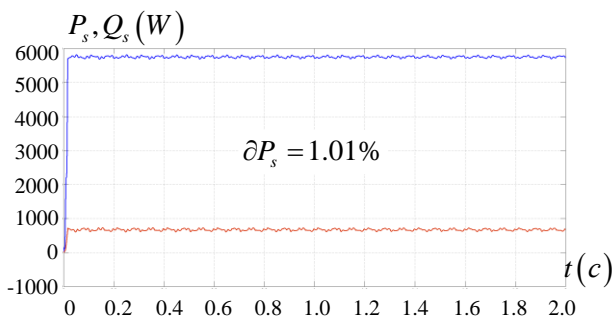


а

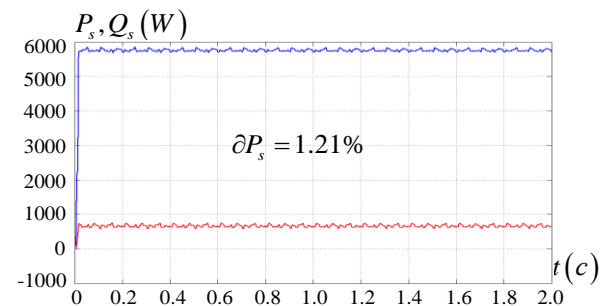


б

Рис. 4.13 Осциллограммы токов на приемной I_r системе.

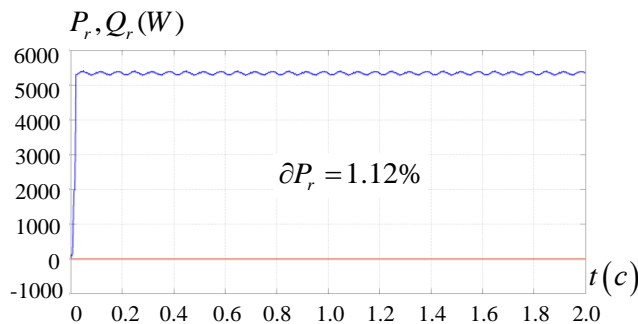


а

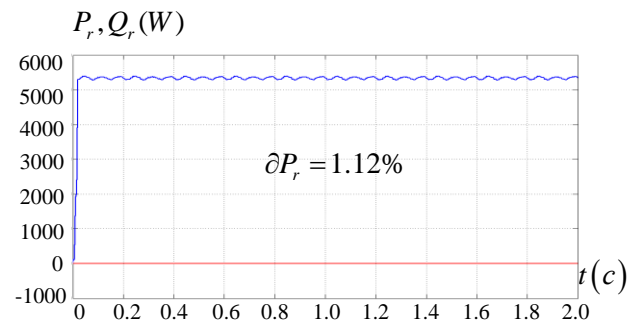


б

Рис. 4.14 Активные и реактивные мощности на передающей системе



а



б

Рис. 4.15 Активные и реактивные мощности на приемной системе

Результаты, полученные в процессе вычислительных экспериментов при других заданных соотношениях частот и вариантах присоединения нагрузки приведены в виде осциллограмм и таблиц в Приложении А7.

Для проведения сравнительного анализа, в соответствии с данными Приложения А7, построены гистограммы при различных частотах скольжения и способах секционирования обмоток управления, представленные на рис. 4.16-4.19. Режимные параметры с индексом «L» соответствуют варианту питания нагрузки по схеме рис. 4.11, без индекса – рис.4.10.

На приведенных ниже рисунках буквой «а» обозначаются гистограммы иллюстрирующие степени стабильности передаваемой активной мощности, а под буквой «б»- коэффициент гармонического искажения токов.

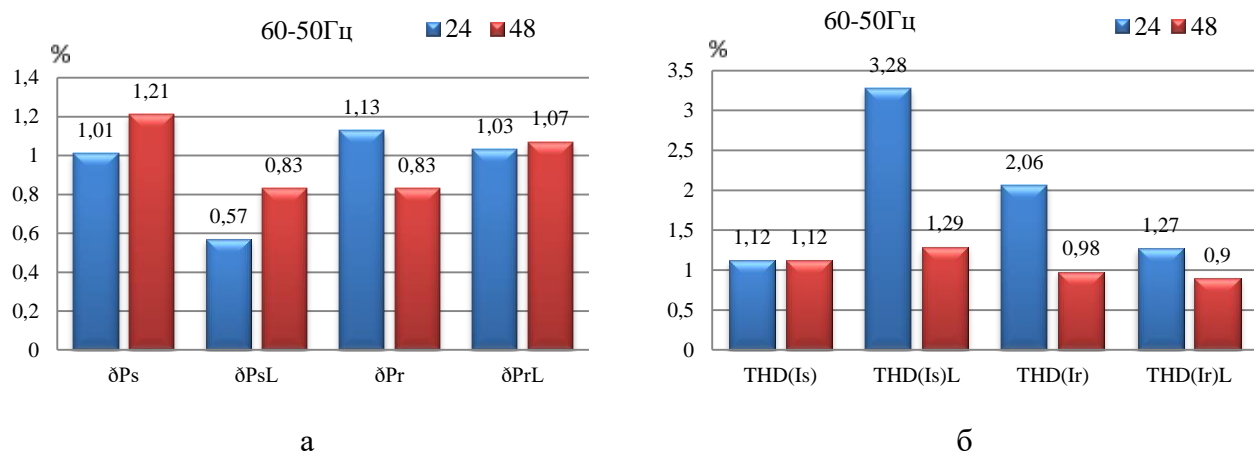


Рис. 4.16 Гистограммы режимных параметров, определяющих качество преобразования при работе устройства на активную нагрузку и соотношении частот 60-50 Гц.

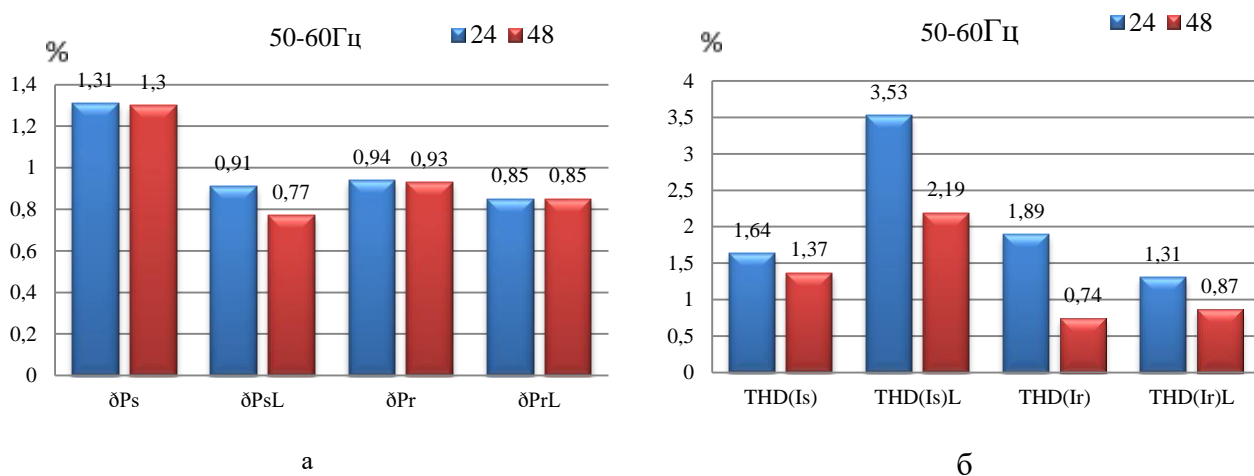
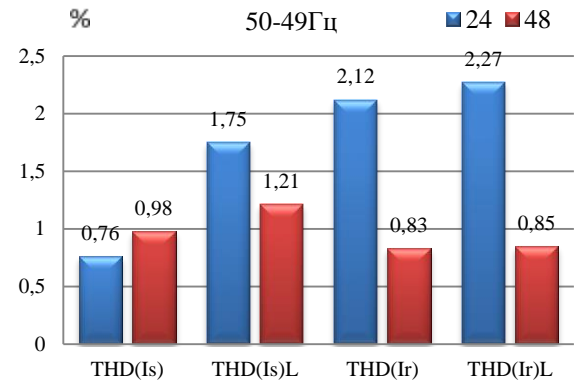
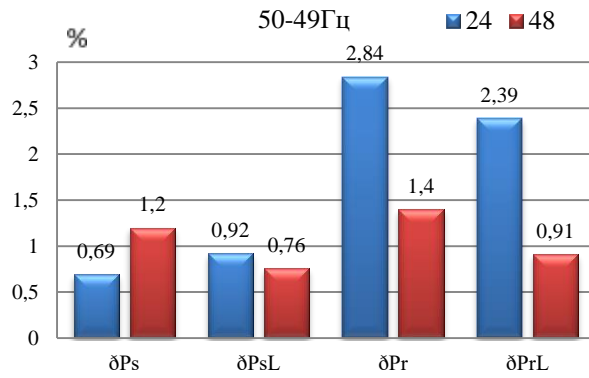


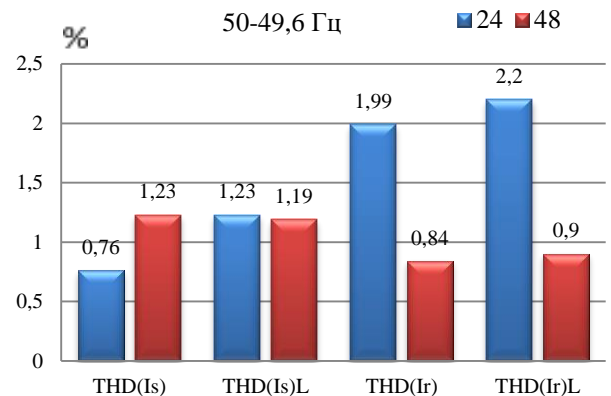
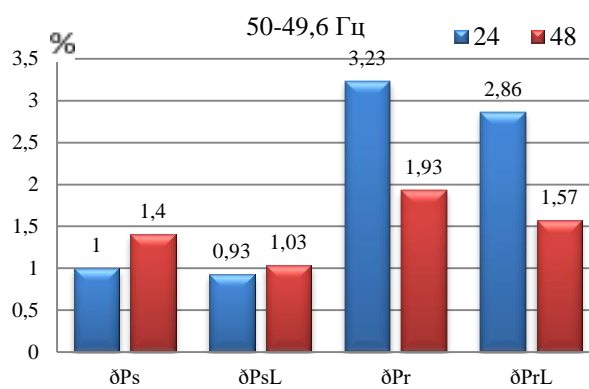
Рис. 4.17 Гистограммы режимных параметров, определяющих качество преобразования при работе устройства на активную нагрузку и соотношении частот 50-60 Гц.



а

б

Рис. 4.18 Гистограммы режимных параметров, определяющих качество преобразования при работе устройства на активную нагрузку и соотношении частот 50-49 Гц.



а

б

Рис. 4.19 Гистограммы режимных параметров, определяющих качество преобразования при работе устройства на активную нагрузку и соотношении частот 50-49,6 Гц.

Анализируя результаты расчетных экспериментов в части оценки стабильности передаваемой мощности можно прийти к следующим выводам:

- при работе устройства на нагрузку величина степени стабильности передаваемой мощности на приемной системе при 48 позиционном секционировании выше, чем при 24 позиционном при различных соотношениях частот преобразования. Причем, разница тем больше, чем ниже частота скольжения. Такой же характер степени стабильности наблюдается и при работе на активную нагрузку через ЛЭП с той лишь разницей, что абсолютное значение отклонения снижается примерно на 30-40%;

- при работе на приемную систему применение 48 позиционного секционирования выглядит более эффективно, чем 24 позиционное. Максимальный эффект наблюдается при частоте скольжения 0,4 и 1 Гц. Однако следует отметить, что в этом случае сте-

пень стабильности существенно ниже, чем при скольжении в 10 Гц. При частоте скольжения 10 Гц степени стабильности близки по значению, как при питании нагрузки через ЛЭП, так и без нее;

- в целом при различных соотношениях частот между передающей и приемной системой степень стабильности передаваемой мощности:
 - для передающей системы находится в диапазоне $0,69 \div 1,4\%$, а при работе через ЛЭП $0,57 \div 1,03\%$;
 - для приемной системы в диапазоне $0,83 \div 3,23\%$, а с ЛЭП $0,85 \div 2,86\%$.

В отношении анализа коэффициента гармонических искажений токов можно сделать следующие выводы:

- на передающей системе наблюдается приблизительное равенство показателей для применяемых вариантов позиционного секционирования. Наряду с этим наименьшее значение коэффициента гармонических искажений имеет место при частоте скольжения 0,4 и 1 Гц. Так же следует отметить, что максимальное значение коэффициента гармонических искажений достигается при передаче мощности с частоты 50 Гц на 60 Гц;

- подключение нагрузки через ЛЭП приводит к существенному, более чем в два раза, увеличению коэффициентов гармонических искажений токов на передающей системе для 24 позиционного секционирования. Следует добавить, что при питании нагрузки через ЛЭП и 48 позиционном секционировании существенно снижается коэффициент гармонических искажений по сравнению с 24 позиционным секционированием для всех режимов преобразования. Диапазон снижения может достигать $0,5 \div 2,0\%$;

- качество преобразования токов для приемной системы на 48 позиционном секционировании во всех режимах присоединения нагрузки и соотношениях частот существенно эффективнее 24 позиционного секционирования. Диапазон снижения коэффициента гармонических искажений токов при 48 позиционном секционировании может достигать $1,0 \div 1,3\%$. Максимальный эффект снижения коэффициента гармонических искажений токов для 48 позиционного секционирования наблюдается на нагрузке при частоте скольжения 0,4 и 1 Гц.

Исследование режимов работы преобразователя на приемную систему через 30-и градусную ЛЭП осуществлялось в соответствии со схемой, представленной на рис. 4.20. Расчетные эксперименты и анализ результатов проводились в соответствии с ранее приведенной структурой.

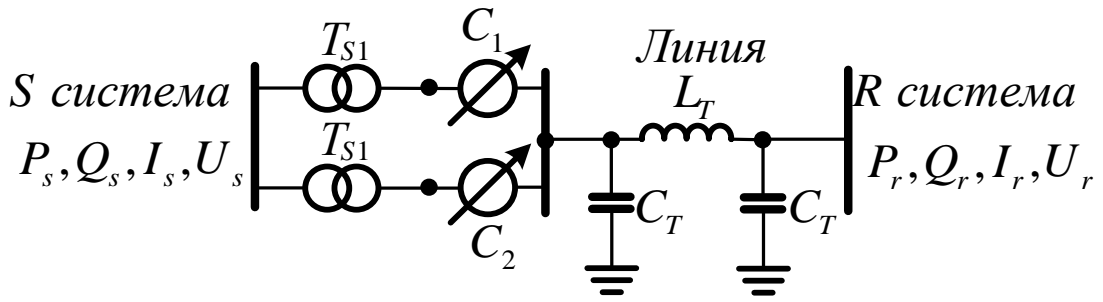


Рис. 4.20 Схема проведения эксперимента при работе 2-х канального преобразователя частоты на систему через 30-и градусную ЛЭП

Результаты вычислительных экспериментов при 24 и 48 позиционном секционировании, разном соотношении частот и мощностей передающей и принимающей систем представлены в виде таблиц в Приложении А7, таблица А7.3 – А7.6. Для сравнительного анализа полученных данных построены графики зависимости режимных параметров при различных соотношениях частот и мощностей передающей и принимающей систем, рис. 4.21 – 4.24.

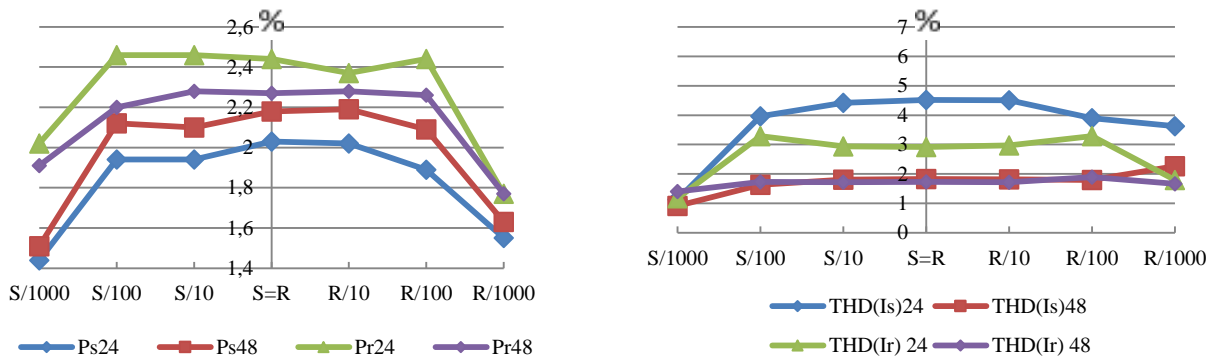


Рис. 4.21 Графики режимных параметров, в зависимости от соотношения мощностей передающей ($S(60Hz)$) и принимающей ($R(50Hz)$) систем.

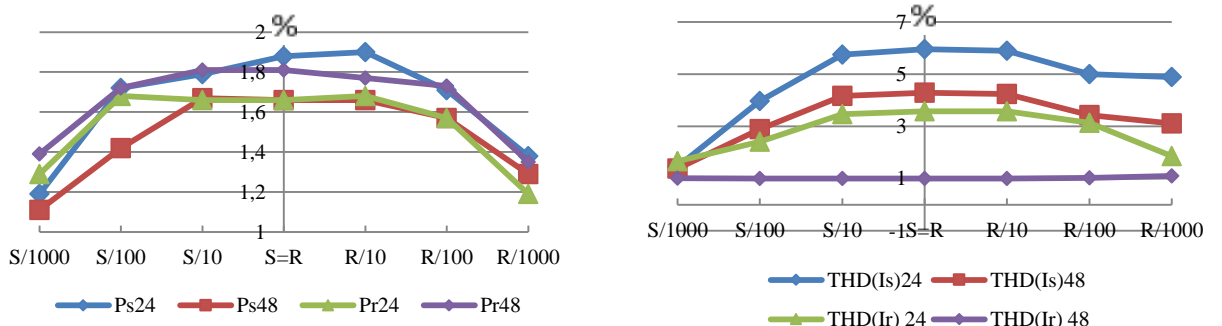


Рис. 4.22 Графики режимных параметров, в зависимости от соотношения мощностей передающей ($S(50Hz)$) и принимающей ($R(60Hz)$) систем.

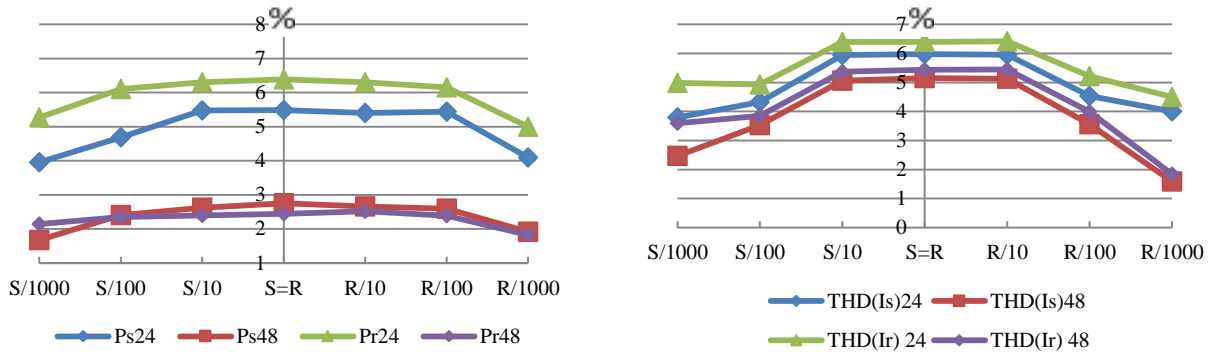


Рис. 4.23 Графики режимных параметров, в зависимости от соотношения мощностей передающей ($S(50Hz)$) и принимающей ($R(49Hz)$) систем.

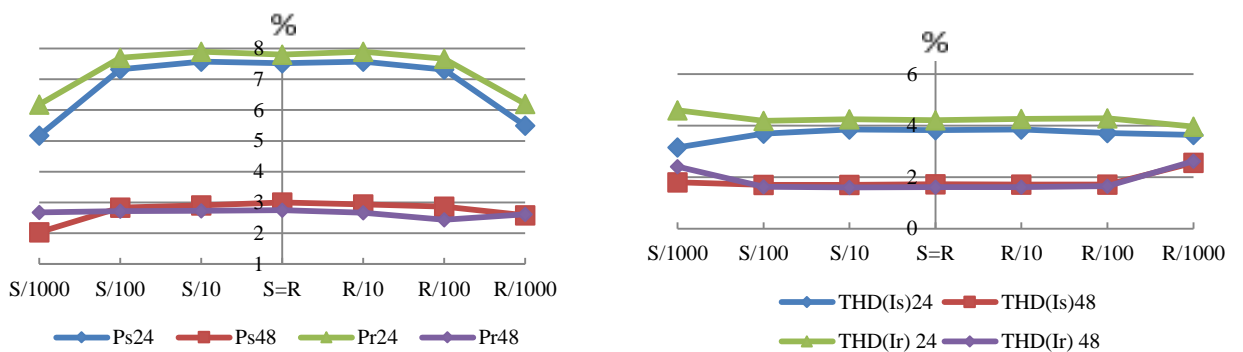


Рис. 4.24 Графики режимных параметров, в зависимости от соотношения мощностей передающей ($S(50Hz)$) и принимающей ($R(49,6Hz)$) систем.

Анализируя результаты вычислительных экспериментов в части стабильности передаваемой мощности можно прийти к следующим выводам:

- максимальные значения степени стабильности передаваемой мощности для всех вариантов соотношения частот и позиционного секционирования наблюдаются при равенстве мощностей передающей и принимающей систем;
- минимальные значения степени стабильности передаваемой мощности наблюдается при соотношении мощностей 1/1000, этот факт свидетельствует об эффективности применения исследуемого преобразователя при подключении к энергосистеме небольших источников с нестабильной рабочей частотой (ВЭУ);
- степень стабильности передаваемой мощности возрастает при уменьшении частоты скольжения между объединяемыми системами. Так, при частоте скольжения в 10 Гц диапазон степени стабильности передаваемой мощности, рис. 4.21, 4.22, составляет 1,1-2,5%, а при частоте скольжения 0,4 и 1 Гц, рис. 4.23, 4.24, составляет 1,5-8%;
- при минимальных значениях частоты скольжения, 0,4 и 1 Гц, и 48 позиционным секционированием величина степени стабильности передаваемой мощности суще-

ственно ниже, чем для 24 позиционного секционирования (в 2-2,5 раза), а при скольжении частоты в 10 Гц отличие в величинах степени стабильности передаваемой мощности между вариантами позиционного секционирования не так заметно.

В отношении анализа коэффициента гармонических искажений токов можно сделать следующие выводы:

- максимальные значения коэффициента гармонических искажений по току для всех вариантов соотношения частот и позиционного секционирования наблюдаются при равенстве мощностей передающей и принимающей систем, рис. 4.21 – 4.23. Исключением является случай при скольжении частоты 0,4 Гц, рис. 4.24, где значения коэффициента гармонических искажений имеет практически линейный характер и не зависит от соотношения мощностей между объединяемыми системами;

- величина коэффициента гармонических искажений по току существенно ниже для 48 позиционного секционирования. Особенно это заметно при малых частотах скольжения, рис. 4.21-4.24;

- коэффициенты гармонических искажений по току на передающей и принимающей системах при 48 позиционном секционировании принимают практически равные значения, рис. 4.21, 4.23, 4.24.

4.3 Исследование характерных режимов работы межсистемной связи с преобразователем

Проведение вычислительных экспериментов при характерных режимах работы устройства выполнялось на основе структурно-имитационной модели преобразователя с 48 позиционным секционированием из-за лучших показателей качества преобразования по отношению к 24 позиционному секционированию.

Процесс исследования включал проведение следующих расчетных экспериментов:

- работа преобразователя при набросе и сбросе нагрузки;
- работа преобразователя при возникновении короткого замыкания на шинах:
 - приемной системы;
 - исследуемого устройства со стороны приемной системы;
 - исследуемого устройства со стороны передающей системы.

При проведении расчетных экспериментов соблюдались следующие условия:

- расчетное время моделирования $t = 2$ секунды;
- напряжение приемной и передающей систем $U_s = U_r = 230V$;

- положительное направление передачи мощности принято от передающей (S) энергосистемы к приемной (R);
- величина передаваемой мощности соответствовала номинальной мощности исследуемого устройства;
- величина нагрузки на приемной системе, имитирующей наброс и сброс мощности, составляла 120 % и 160 % от номинальной мощности устройства;
- соотношение частот передающей и приемной систем принято 60-50 Гц.;
- соотношение мощностей передающей и приемной систем принято 1:1;
- значение угла передачи изменялось на стороне приемной системы за счет корректировки с отрицательным знаком в пределах $\delta_{sr} = 0^\circ \div -60^\circ$;
- параметры структурно-имитационных моделей приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя;

Для анализа качества преобразования частоты и передачи мощности применялись следующие режимные параметры:

- степень стабильности 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;
- длительность переходного процесса после отключения повреждения, вызвавшего возмущением в электрической сети t_{np}, c .

Исследование работы устройства при сбросе - набросе нагрузки выполнялось по следующему сценарию:

В начальный момент времени устройство работает с номинальной мощностью, через время $t_1 = 0,75 c$ происходит наброс нагрузки соответствующий 120% перегрузке устройства, при $t_2 = 1,25 c$ происходит дополнительный наброс нагрузки, в результате перегрузка устройства составляет 160%. Затем при $t_3 = 1,75 c$ происходит сброс нагрузки до номинального уровня передачи. Проведение эксперимента осуществлялось в соответствии со схемой, представленной на рис. 4.10. Результаты проведения эксперимента представлены на осциллограммах мощностей (рис. 4.25-4.26) и токов (рис. 4.27-4.30).

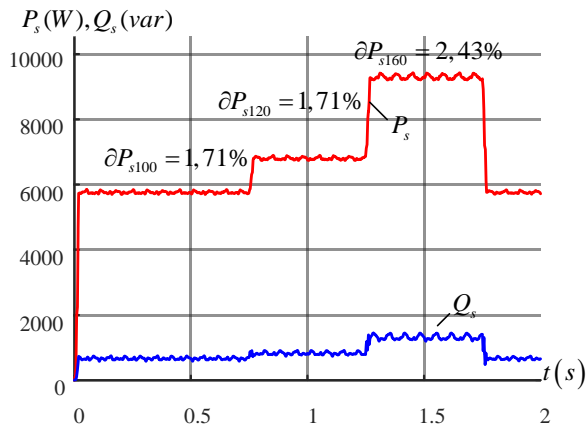


Рис. 4.25 Мощности на передающей системе в момент наброса и сброса нагрузки

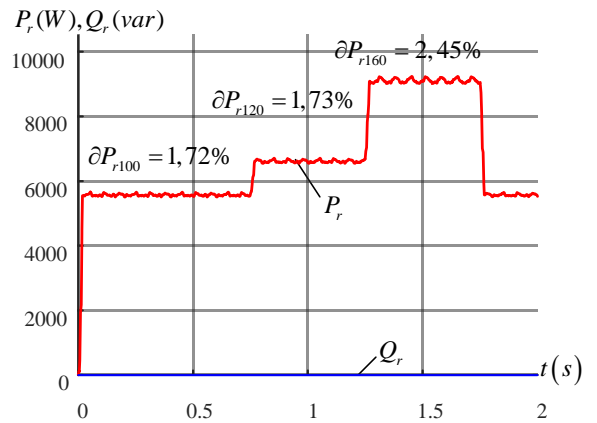


Рис. 4.26 Мощности на приемной системе в момент наброса и сброса нагрузки

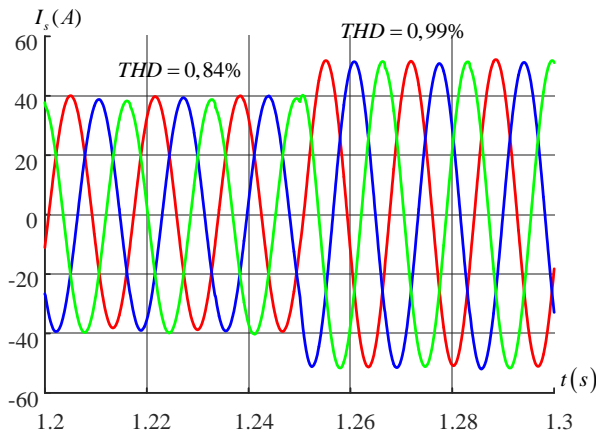


Рис. 4.27 Ток на передающей системе в момент наброса нагрузки

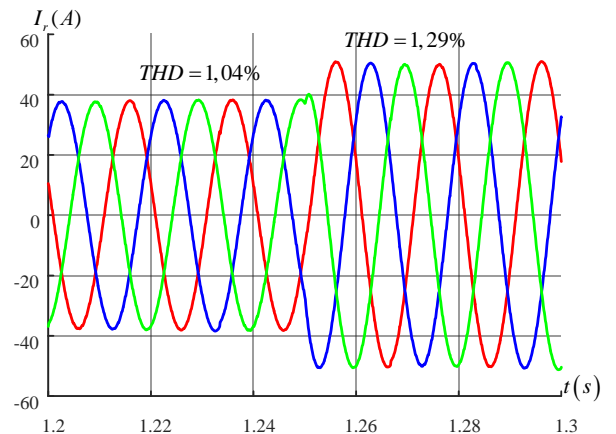


Рис. 4.28 Ток на приемной системе в момент наброса нагрузки

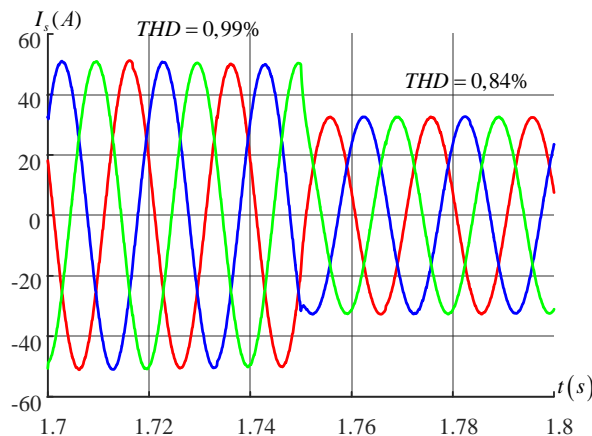


Рис. 4.29 Ток на передающей системе в момент сброса нагрузки

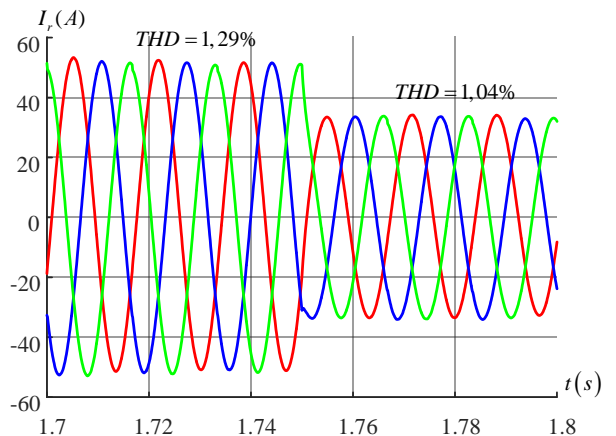


Рис. 4.30 Ток на приемной системе в момент сброса нагрузки

Анализируя осциллограммы представленные на рис. 4.25 – 4.30 можно сделать следующие выводы:

- характер степени стабильности передаваемой мощности при перегрузке устройства в 120% от номинальной мощности остается неизменным, а при 160 % перегрузке увеличивается в два раза и составляет на передающей системе 2,43%, а на приемной системе 2,25% (рис. 4.25 – 4.26);

- преобразователь частоты мгновенно реагирует на наброс и сброс нагрузки, при этом броска токов не происходит, а качество преобразования токов практически не изменяется. Так при перегрузке в 120% качество преобразования токов на передающей $THD(I_s)$ и приемной $THD(I_r)$ системах остается неизменным, а при 160% перегрузке, коэффициент гармонических искажений токов увеличивается на 0,15 %.

Исследование работы устройства при возникновении короткого замыкания: на шинах приемной системы (рис. 4.31), на шинах исследуемого устройства со стороны приемной системы (рис. А7.15) и на шинах со стороны передающей системы (рис. А7.24).

В начальный момент времени устройство работает при номинальном значении передаваемой мощности, через время $t_1 = 0,35c$ возникает трехфазное короткое замыкание и отключается при $t_2 = 0,5c$, в результате асинхронная УМС нарушается, а устройство продолжает работать на нагрузку. В момент времени $t_3 = 0,75c$ происходит восстановление асинхронной УМС, при $t_4 = 1,25c$ происходит наброс нагрузки, а в момент $t_5 = 1,75c$ сброс нагрузки до номинального уровня передачи.

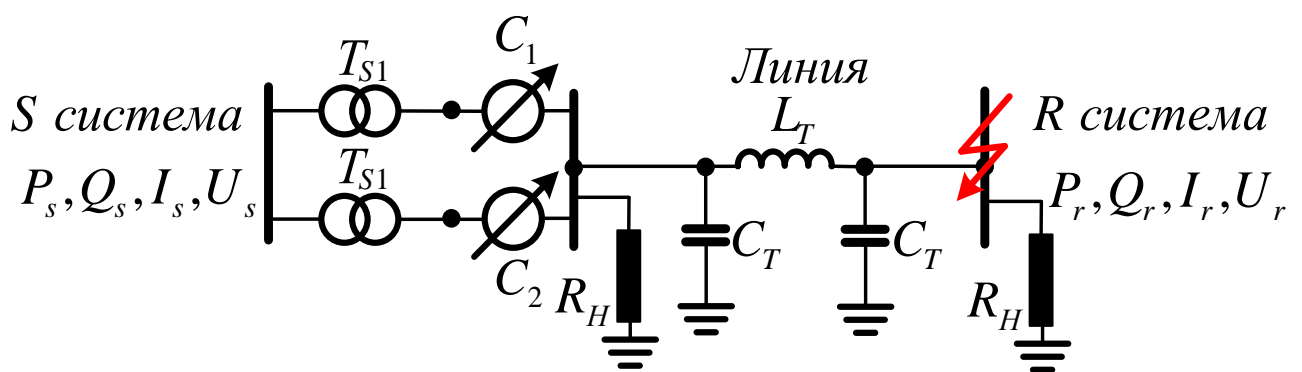


Рис. 4.31 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах приемной системы

Результаты вычислительных экспериментов приведены в виде осциллограмм токов и мощностей на передающей и принимающей системах в момент возникновения короткого замыкания и после его устранения и представлены на рис. 4.32 – 4.37 и 4.38 – 4.39 соответственно.

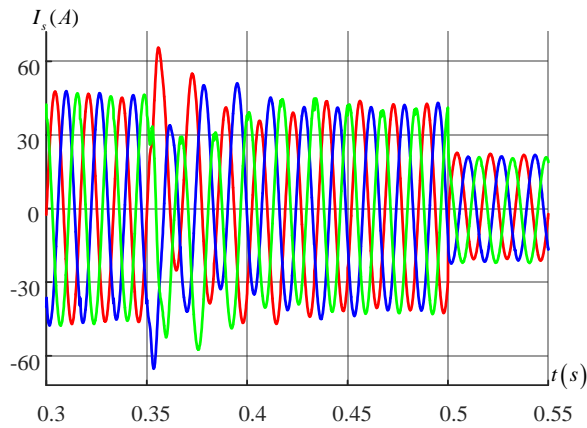


Рис. 4.32 Ток на передающей системе в момент возникновения и отключения КЗ

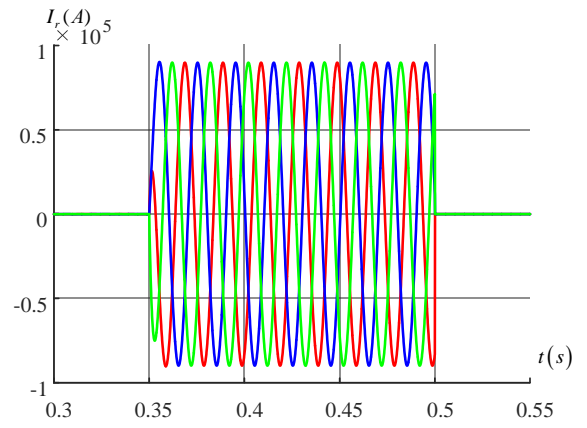


Рис. 4.33 Ток на приемной системе в момент возникновения и отключения КЗ

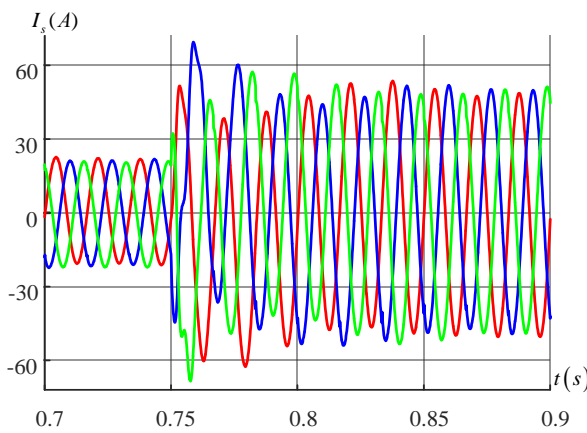


Рис. 4.34 Ток на передающей системе в момент восстановления асинхронной УМС

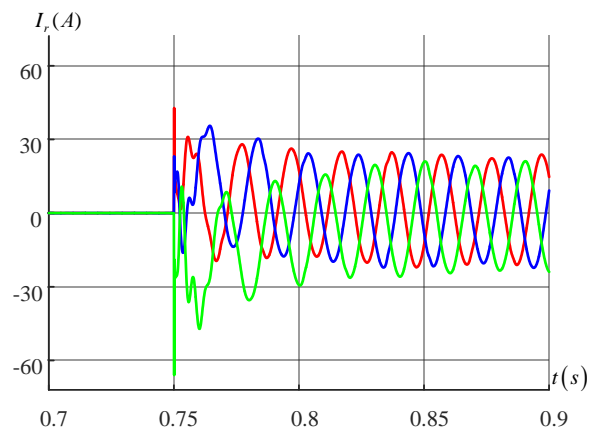


Рис. 4.35 Ток на приемной системе в момент восстановления асинхронной УМС

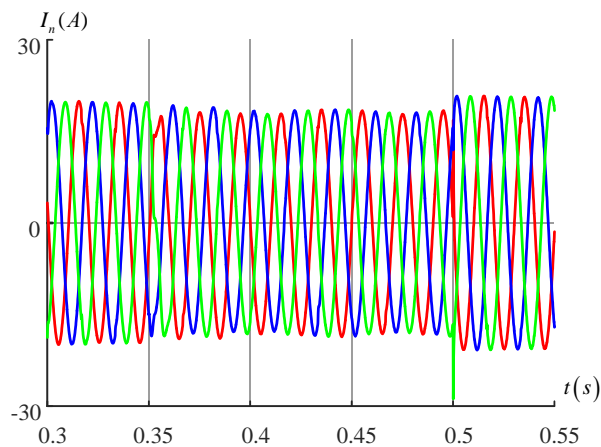


Рис. 4.36 Токи на нагрузке в момент возникновения короткого замыкания

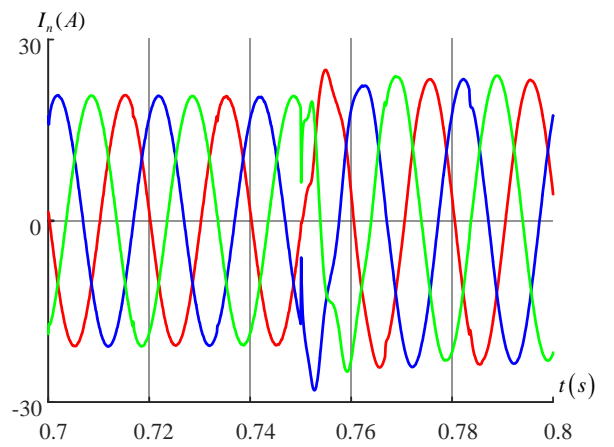


Рис. 4.37 Токи на нагрузке в момент восстановления асинхронной УМС

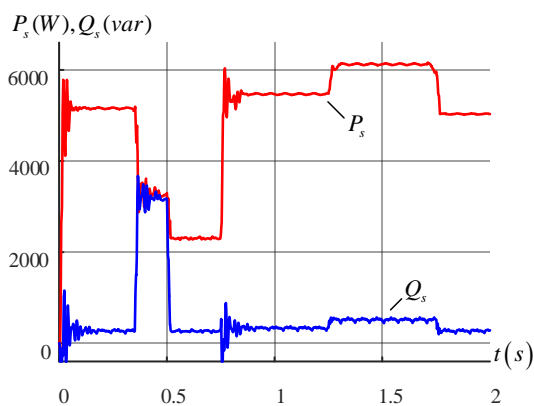


Рис. 4.38 Мощности на передающей системе при проведении этапов моделирования

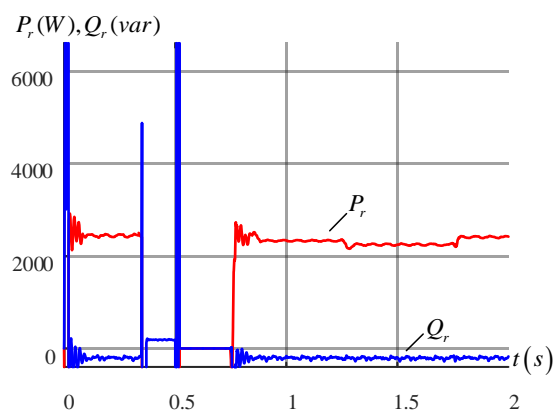


Рис. 4.39 Мощности на приемной системе при проведении этапов моделирования

Результаты вычислительных экспериментов при возникновении короткого замыкания на шинах исследуемого устройства со стороны приемной системы приведены в приложении А7 в виде осциллограмм токов и мощностей на рис. А7.16 – рис.А7.23, а со стороны передающей системы так же представлены в приложении А7 в виде осциллограмм токов и мощностей на рис. А7.25 – рис.А7.32.

Анализируя полученные результаты работы устройства при характерных режимах можно прийти к следующим выводам:

- при незначительных отклонениях от нормального режима работы сети, таких как наброс и сброс нагрузки или удаленные повреждения, устройство в течение времени от 0 до 0,1 сек обеспечивает завершение всех переходных процессов без применения каких либо средств управления с отклонением мощности от выбранного режима работы в пределах не превышающих 2,5 %, а частота изменяется от 0 до 0,25 Гц/сек;
- при значительных отклонениях от нормального режима работы сети, таких как отклонение напряжения, частоты или близкое повреждение, система, после отключения повреждения, устройство восстанавливает режим, в течение 0,15 сек и стабилизирует уровень передаваемой мощности.

Выводы по четвертой главе

1. Предложен вариант преобразователя частоты на базе статического трансформатора. Данное устройство позволяет обеспечить круговое вращение фазы выходного напряжения относительно входного по разработанному закону «грубого» управления через 120° и законах «тонкого» управления с дискретностью ступени 5° и $2,5^\circ$;

2. Результаты экспериментов режимных характеристик показали возможность построения преобразователя частоты на основе предложенной схемы устройства. Оценка качества преобразования при различных частотах скольжения между передающей и при-

емной системами, а так же при различных условиях подключения устройства показала, что параметры качества преобразования значительно отличаются для 48 и 24 позиционного секционирования. Исследование режимов работы преобразователя при организации асинхронной УМС между энергосистемами различной мощности показало, что степени стабильности передаваемой мощности имеют тенденцию к уменьшению при увеличении разницы между мощностями систем, что свидетельствует об эффективности применения преобразователей при подключении к энергосистеме небольших источников с нестабильной рабочей частотой.

Анализ режимных характеристик в целом позволяет сделать вывод об эффективности применения 48 позиционного секционирования, более того качество преобразования при указанном законе «тонкого» управления тем выше, чем меньше частота скольжения между объединяемыми системами.

3. Результаты исследования характерных режимов работы межсистемной связи на основе устройства показали эффективность и хорошую реакцию преобразователя частоты на исследуемые типы возмущений. Так при значительных и незначительных отклонениях от нормального режима работы степень стабильности передаваемой мощности не превышает 2,5 %, коэффициент гармонических искажений находится в диапазоне от 0,84 % до 1,29 %, частота изменяется в пределах от 0 до 0,25 Гц/сек, а время завершения всех переходных процессов не превышает 0,15 сек.

5. УПРАВЛЯЕМАЯ МЕЖСИСТЕМНАЯ СВЯЗЬ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, ВЫПОЛНЕННОГО ПО СХЕМЕ «ШЕСТИУГОЛЬНИК»

5.1 Принципиальная схема и принцип работы устройства

Принципиальная электрическая схема объекта исследования представлена на рис. 5.1.

Устройство позволяет обеспечить асинхронную УМС на основе реализации принципа кругового вращения фазы выходного напряжения без разделения процесса согласования на поочередную работу каналов, в отличие от устройства описанного в пункте 4.

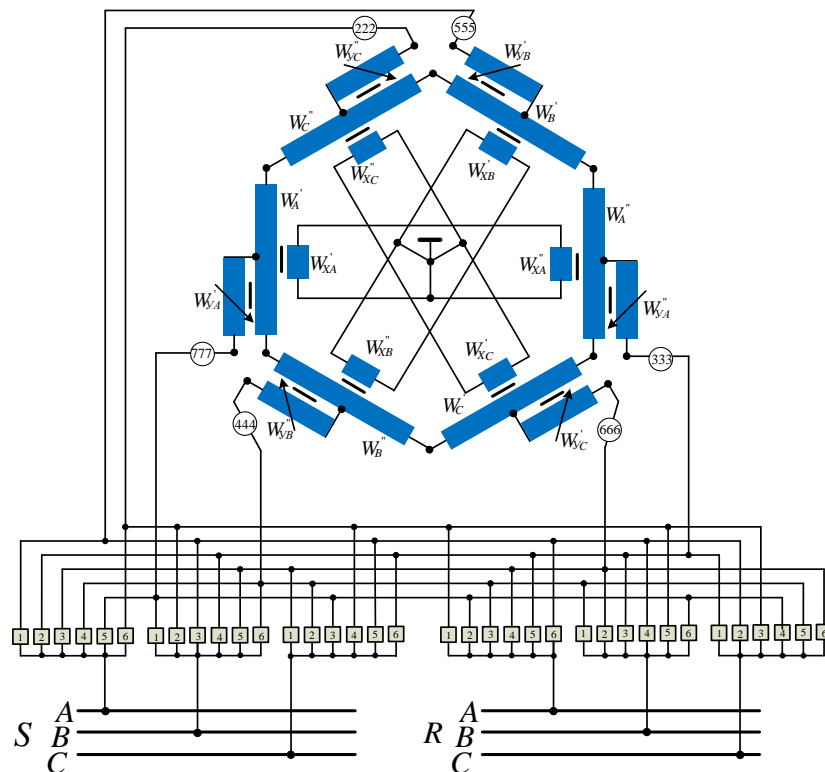


Рис. 5.1 Электрическая схема статического преобразователя частоты, выполненного по схеме «шестиугольник»

Статический преобразователь, представленный на рис. 5.1, состоит из двух однофазных трех обмоточных трансформаторов на фазу соединенных по схеме «шестиугольник». Первичной обмоткой каждого однофазного трансформатора является обмотка управления и обозначены как W'_1, W'_2, W'_3 . Начало указанных обмоток подключается к передающей и приемной системам, а концы обмоток подключены к середине вторичных обмоток и обозначены как W_1, W_2, W_3 . Начало третьих обмотки двух однофазных трансформаторов каждой фазы соединены между собой, а концы данных обмоток подключаются к нулевой точке образуя схему звезда.

Обмотки управления являются средством «тонкого» управления и благодаря силовым ключам обеспечить фазовый сдвиг напряжения в диапазоне $\pm 30^\circ$ тем самым создавая 60° фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением в каждом однофазном трансформаторе.

Схема соединения «шестиугольник» позволяет получить шестифазную систему напряжений из трехфазной и обеспечить одновременную работу двух многообмоточных однофазных трансформаторов в каждой фазе. Как следствие, в одной фазе одновременно в работе находятся две обмотки «тонкого» управления, позволяющие обеспечить 120° фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением. Посредством срабатывания ключей «грубого» управления обмотки «тонкого» управления возвращаются в исходное состояние относительно напряжения сдвинутого по фазе на угол 120° .

Процесс кругового вращения фазы выходного напряжения рассмотрим на примере фазы «А» (рис. 5.2).

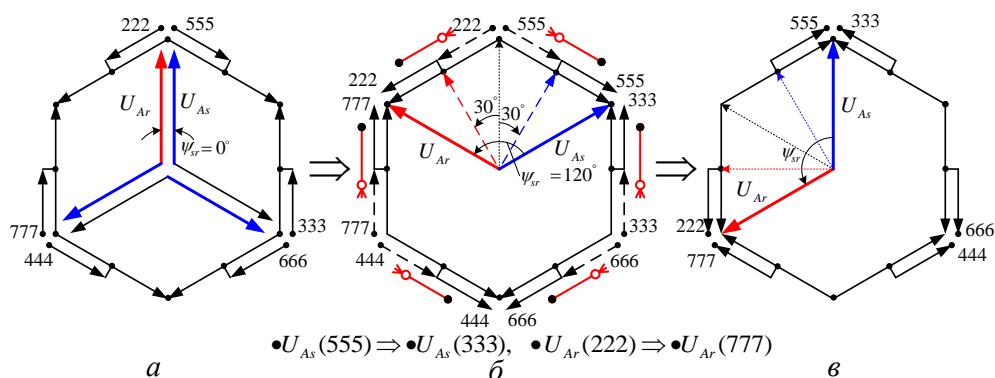


Рис. 5.2 Векторная диаграмма напряжений первого сектора «грубого» управления

а - исходное состояние устройства; б - процесс обеспечения угла фазового сдвига;

в - окончание процесса фазового сдвига и срабатывание ключей «грубого» управления.

В исходном состоянии входное напряжение U_{As} и выходное U_{Ar} совпадают по фазе, так как обмотки управления со стороны входного и выходного напряжения включены встречно, рис. 5.2 а. В соответствии с ранее описанным в пункте 4.1 законом «тонкого» управления, обмотки управления в процессе работы силовых ключей переводятся из встречного в согласное состояние. Результатом таких действий является обеспечение 120° сдвига по фазе между выходным и входным напряжением, а по отношению к исходному состоянию векторов напряжения обеспечивается 60° сдвиг по фазе, рис. 5.2 б.

По завершению работы «тонкого» управления отработывают силовые ключи «грубого» управления. В результате действия данных ключей, устройство выполняет поворот

на угол 60° , рис. 5.2 в, при этом угол в 120° между входным и выходным напряжением остается неизменным. Обмотки «тонкого» управления становятся включенными согласно и позволяют увеличить угол фазового сдвига между входным и выходным напряжением еще на 120° , рис. 5.3 а, тем самым обеспечивая фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением в 240° (сектор II). После окончания процесса во II секторе, происходит переключение ключей «грубого» управления, обеспечивающих поворот устройства на угол 60° и дальнейшую работу преобразователя в III секторе.

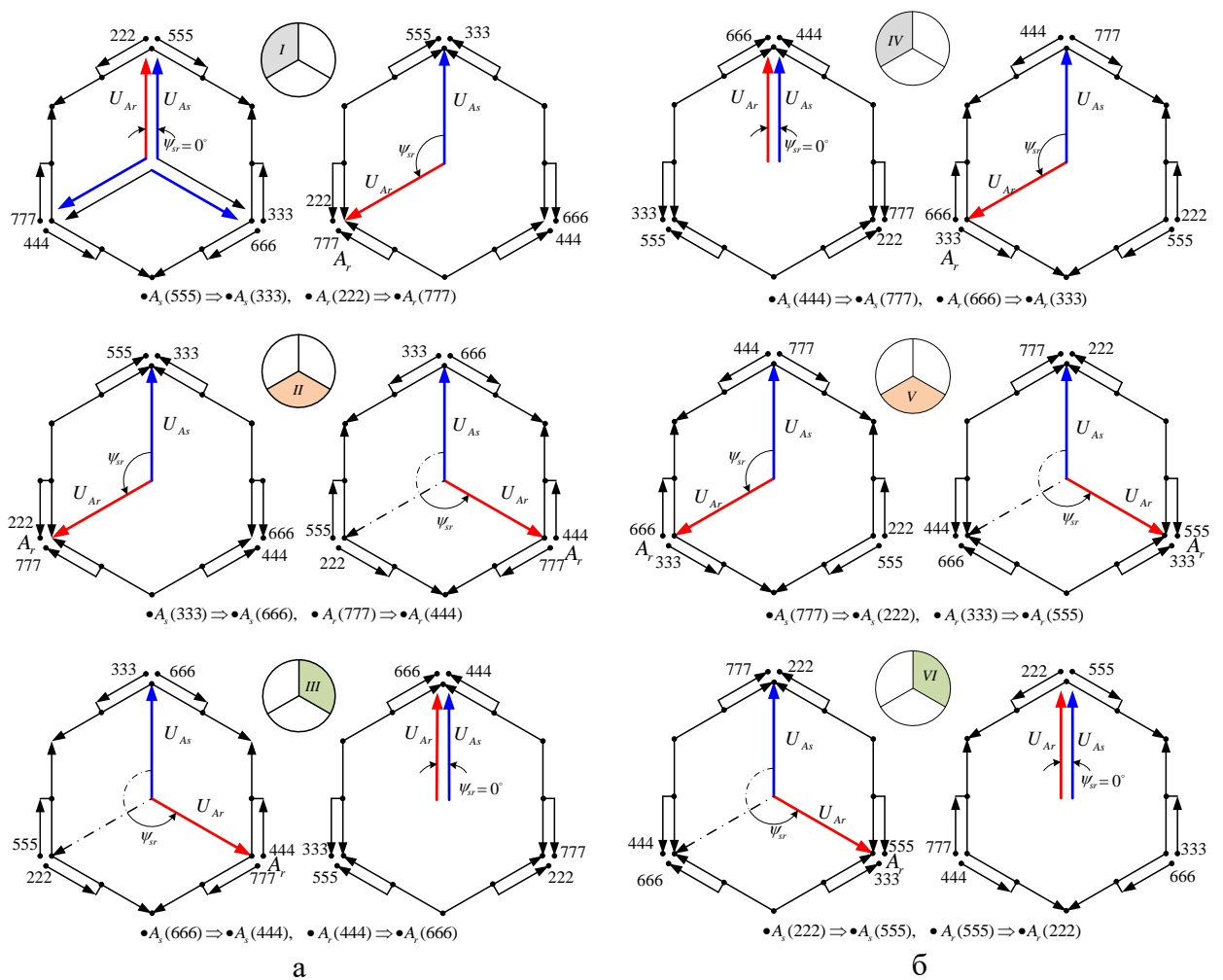


Рис. 5.3 Векторная диаграмма поясняющая закон «грубого» управления

В результате окончания работы устройства в III секторе выходное напряжение U_{Ar} относительно входного U_{As} совершает оборот на 360° . Устройство в этот момент поворачивается на 180° относительно своего исходного состояния. Для восстановления исходного состояния схемы, устройство должно продолжить вращение еще на 180° , при этом вы-

ходное напряжение U_{Ar} совершит второй оборот на 360° относительно входного напряжения U_{As} , рис. 5.3 б.

Для изучения режимных параметров статического преобразователя частоты, выполненного по схеме «шестиугольник», были выполнены расчетные эксперименты для двух законов «тонкого» управления, описанных в пункте 4.1.

Эксперименты проводились при работе преобразователя на активную нагрузку и соблюдении следующих условий:

- расчетное время моделирования $t = 2$ секунды;
- напряжение приемной и передающей систем $U_s = U_r = 230V$;
- значение угла передающей системы $\delta_s = 0^\circ$;
- положительным, принято направление передачи мощности от передающей (S) энергосистемы к приемной (R) ;
- величина передаваемой мощности соответствовала номинальной мощности устройства;
- ток на выходе устройства для всех расчетных экспериментов поддерживался на уровне $I_r = 24A \pm 10\%$, что соответствует номинальному значению;
- соотношение частот передающей и приемной систем приняты 60-50 Гц;
- параметры структурно-имитационной модели двухканального преобразователя частоты приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя:
- $U'_A = U''_A = U'_B = U''_B = U'_C = U''_C = 230 V$ - напряжение первичной обмотки;
- $I'_A = I''_A = I'_B = I''_B = I'_C = I''_C = 24A$ - ток первичной обмотки;
- $U'_{XA} = U''_{XA} = U'_{XB} = U''_{XB} = U'_{XC} = U''_{XC} = 115 V$ - напряжение вторичной обмотки;
- $I'_{XA} = I''_{XA} = I'_{XB} = I''_{XB} = I'_{XC} = I''_{XC} = 12 A$ - ток вторичной обмотки;
- $U'_{yA} = U''_{yA} = U'_{yB} = U''_{yB} = U'_{yC} = U''_{yC} = 115 V$ - напряжение обмотки управления;
- $I'_{yA} = I''_{yA} = I'_{yB} = I''_{yB} = I'_{yC} = I''_{yC} = 12 A$ - ток обмотки управления.
- $I_{SM5} = I_{SN5} = I_{RM5} = I_{RN5} = 12 A$.

Для оценки качества преобразования частоты и передачи мощности применялись следующие режимные параметры:

- степень стабильности 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.

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 5.4.

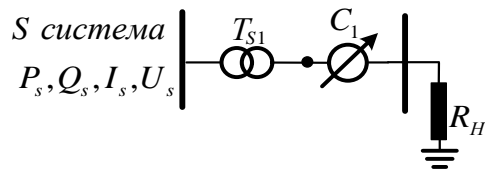


Рис. 5.4 Схема проведения эксперимента

Результаты расчетных экспериментов приведены в виде осциллограмм мощностей и токов на передающей и приемной системе при 24 позиционном секционировании обмотки «тонкого» управления представлены на рис. 5.5 и 5.6, а при 48 позиционном секционировании на рис. 5.7 и 5.8.

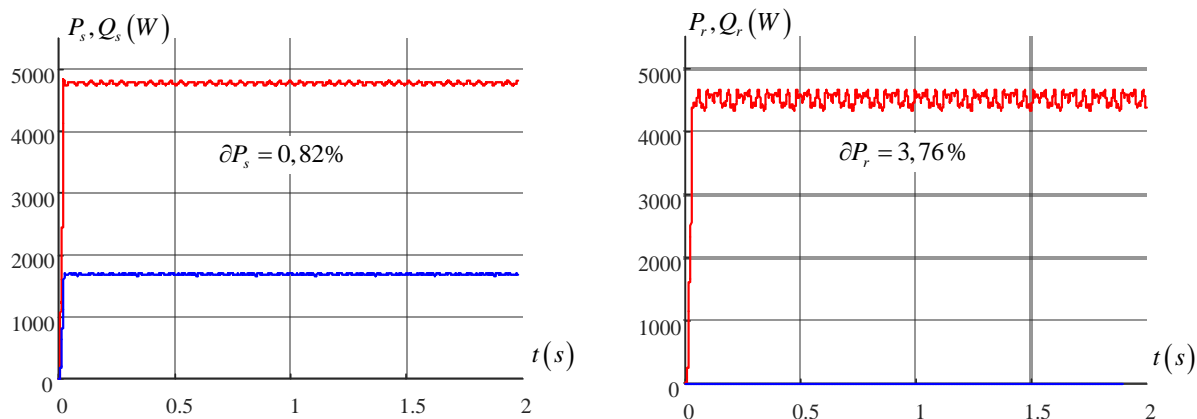


Рис. 5.5 Мощности на передающей и приемной системах при 24 позиционном секционировании

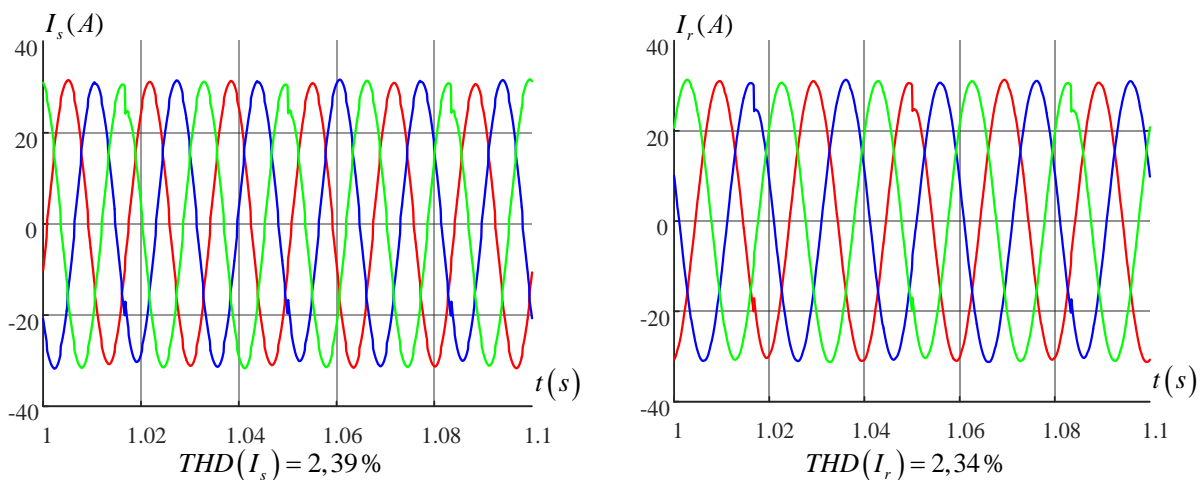


Рис. 5.6 Токи на передающей и приемной системах при 24 позиционном секционировании.

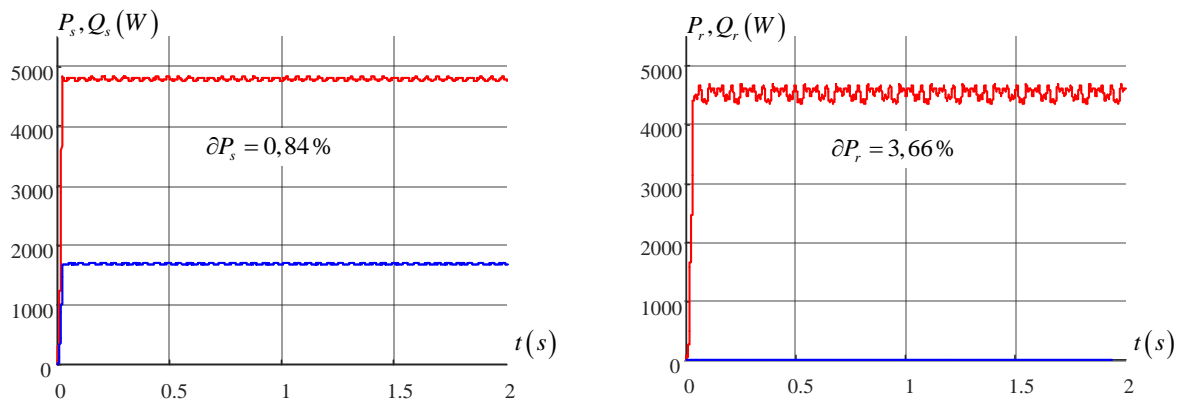


Рис. 5.7 Мощности на передающей и приемной системах при 48 позиционном секционировании.

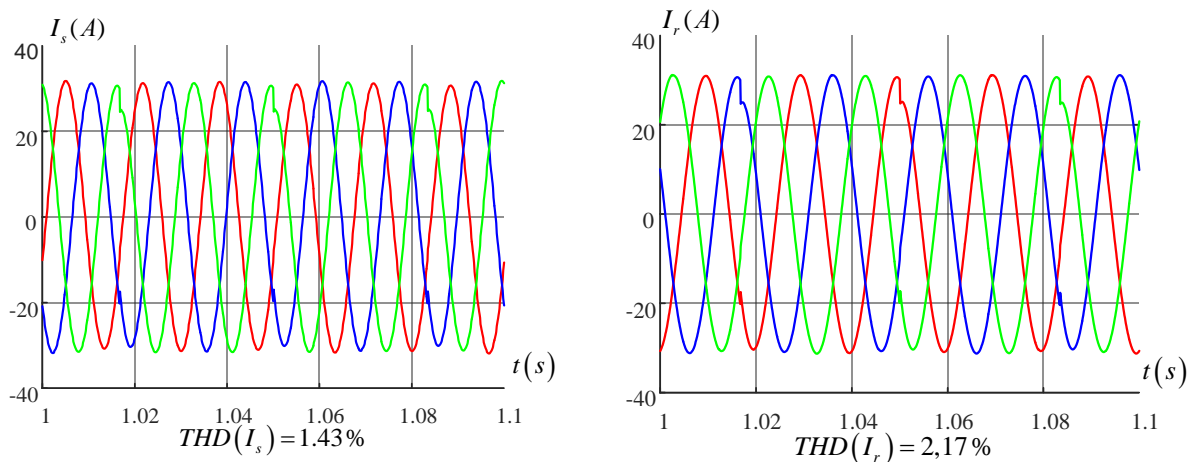


Рис. 5.8 Токи на передающей и приемной системах при 48 позиционном секционировании.

Анализ полученных характеристик описывающих работы устройства показал что:

- при работе устройства на нагрузку на передающей системе наблюдается приблизительно равенство величины степени стабильности передаваемой мощности для применяемых вариантов позиционного секционирования, а на приемной системе при 48 позиционном секционировании степень стабильности передаваемой мощности на 0,1% ниже, чем при 24 позиционном;

- в отношении анализа коэффициента гармонических искажений токов на приемной системе наблюдается приблизительно равенство показателей для применяемых вариантов позиционного секционирования. На передающей системе коэффициент гармонических искажений при 48 позиционном секционировании в 1.7 раза меньше чем при 24;

На основании анализа работы преобразователя можно сделать вывод о необходимости разработки мероприятий для улучшения качества преобразования и повышения степени стабильности передаваемой мощности. Для этого предложено:

- использовать при построении устройства принцип многоканальности;

- разработать согласующие трансформаторы, позволяющие обеспечить корректную работу устройства при различном количестве каналов;
- согласовать начальное положение силовых ключей законов «тонкого» управления при работе устройства в многоканальном режиме;
- разработать законы и стратегию согласования каналов.

5.2 Режимы работы многоканальных преобразователей

Для организации работы многоканальных преобразователей были разработаны согласующие трансформаторы, принципиальные схемы которых с вариантами подключения каналов приведены на рис.5.9 и 5.10 для двух и четырехканальных устройств соответственно.

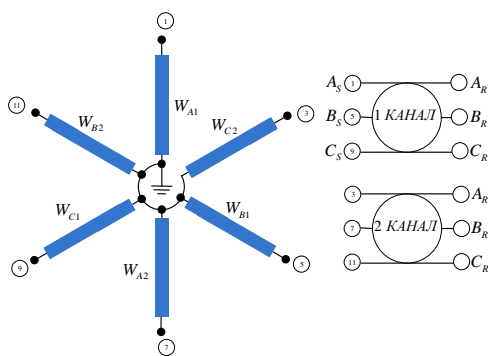


Рис. 5.9 Согласующий трансформатор для двухканального преобразователя

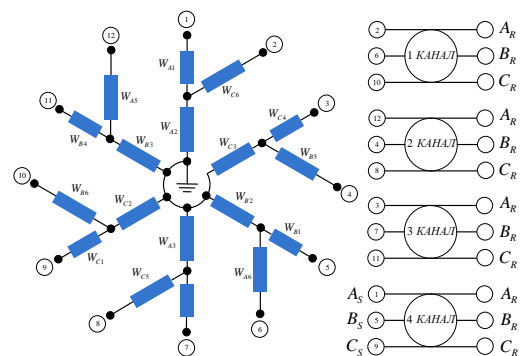


Рис. 5.10 Согласующий трансформатор для четырехканального преобразователя

Обмотки согласующих трансформаторов рассчитаны на ток 48 А, при двухканальной схеме, и на ток 96 А, при четырехканальной схеме преобразователя. Схемы соединения обмоток согласующих трансформаторов организованы таким образом, чтобы при двухканальной схеме устройства обеспечивался 60° сдвиг между каналами, а при четырехканальной схеме 30° сдвиг. Такой сдвиг между каналами устройства может позволить улучшить характеристики преобразования по току, а также повысить степень стабильности передаваемой мощности при работе устройства в составе УМС двух асинхронной или синхронно работающих систем с разными стандартами по поддержанию частоты.

Для обеспечения работы устройства в многоканальном режиме законы «тонкого» управления для 24 и 48 позиционного секционирования согласованы в зависимости от количества каналов с указанием исходных положений силовых ключей и представлены на рис. 5.11 и 5.12 соответственно. Закон «грубого» управления при организации многоканальных схем не претерпевает изменений.

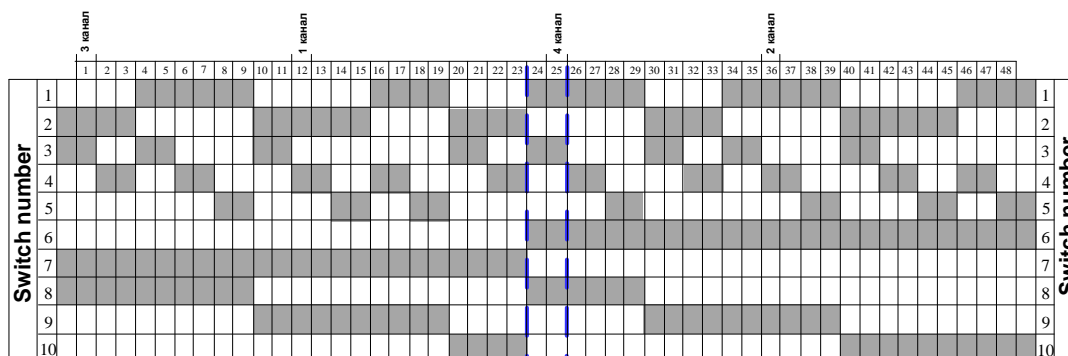


Рис. 5.11 Закон управления преобразователем с дискретностью ступени 5°

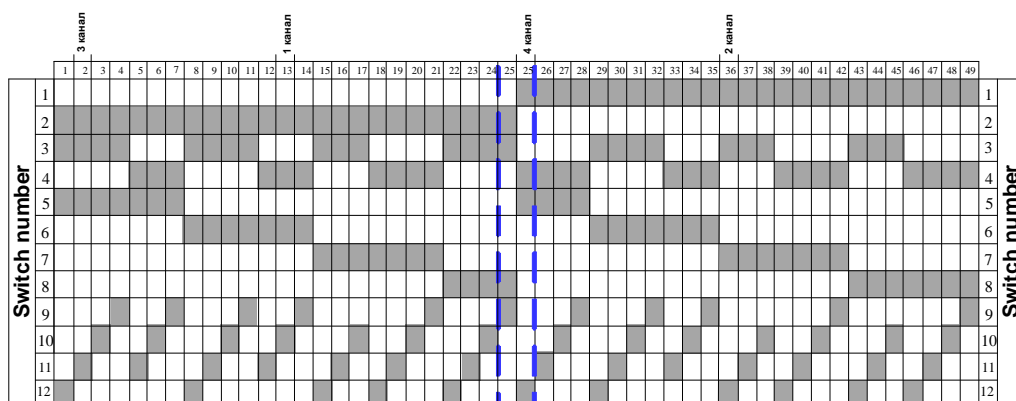


Рис. 5.12 Закон управления преобразователем с дискретностью ступени $2,5^\circ$

Для проведения анализа режимов работы многоканальных преобразователей выполнен ряд вычислительных экспериментов: работа в двухканальном режиме при 24 и 48 позиционном секционировании и уровне передаваемой мощности соответствующей 100%, 65% и 30% номинальной мощности устройства ($I_{ном} = 48 A$); работа в четырехканальном режиме при 24 и 48 позиционном секционировании и уровне передаваемой мощности соответствующей 100%, 65% и 30% номинальной мощности устройства ($I_{ном} = 96 A$).

Вычислительные эксперименты проводились на основе структурно-имитационных моделей статического преобразователя частоты выполненного по схеме «шестиугольник» при соблюдении следующих условий:

- расчетное время моделирования $t = 2$ секунды;
- напряжение приемной и передающей систем $U_s = U_r = 230V$;
- значение угла передающей системы $\delta_s = 0^\circ$;
- положительным, принято направление передачи мощности от энергосистемы (S) к энергосистеме (R);

- величина передаваемой мощности соответствовала 100%, 65% и 30% от номинальной мощности устройства;
- соотношение частот передающей и приемной систем принято 60-50 Гц;
- соотношение мощностей передающей и приемной систем принято 1:1;
- параметры структурно-имитационных моделей приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя и для каждого канала соответствуют параметрам одноканального преобразователя приведенных в пункте 5.1;

Для оценки качества преобразования частоты и передачи мощности использовались следующие режимные параметры:

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

По результатам проведения экспериментов получены осциллограммы мощностей и токов на передающей и приемной системах, которые приведены в Приложении А8 на рис. А8.1 – А8.24, результаты обработки которых, а режимные параметры сведены в таблицы 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Работа преобразователя частоты в двухканальном режиме

Количество позиций	δP_s	$THD(I_s)$	δP_r	$THD(I_r)$
Режим 100% уровня передаваемой мощности				
24	0,32	2,11	1,56	1,46
48	0,32	1,1	1,46	1,28
Режим 65% уровня передаваемой мощности				
24	0,35	2,03	1,2	1,34
48	0,31	1,03	1,08	1,1
Режим 30% уровня передаваемой мощности				
24	0,53	1,83	0,73	1,36
48	0,53	0,99	0,59	0,86

Таблица 5.2 – Работа преобразователя частоты в четырехканальном режиме

Количество позиций	δP_s	$THD(I_s)$	δP_r	$THD(I_r)$
Режим 100% уровня передаваемой мощности				
24	0,43	1,14	1,2	0,93
48	0,39	1,02	1,34	0,96
Режим 65% уровня передаваемой мощности				
24	0,47	1,03	0,89	0,82
48	0,43	0,96	0,98	0,83
Режим 30% уровня передаваемой мощности				
24	0,67	0,91	0,61	0,69
48	0,61	0,89	0,56	0,68

Для проведения сравнительного анализа, по данным таблиц 5.1 и 5.2 построены гистограммы, приведенные на рис. 5.13 и 5.14. Данные гистограммы иллюстрируют значения степеней стабильности передаваемой мощности и коэффициентов гармонических искажений тока при различных уровнях передаваемой мощности для двух и четырехканального режима работы преобразователя частоты с учетом 24-х и 48-и позиционного регулирования.

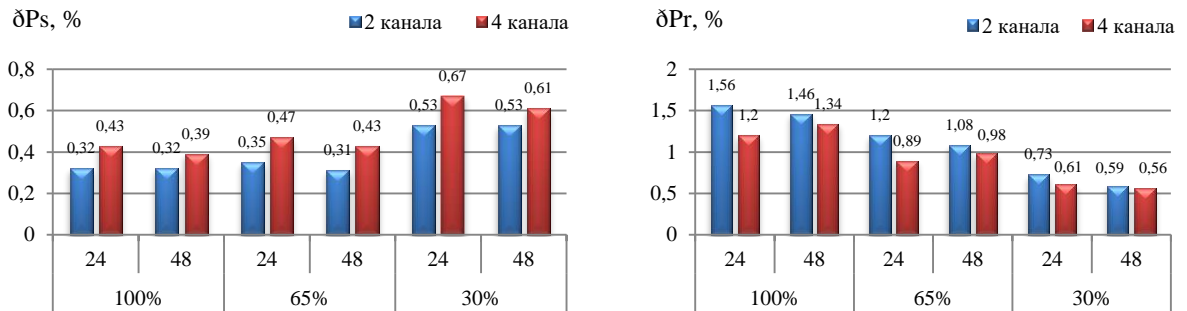


Рис. 5.13 Гистограммы степеней стабильности передаваемой мощности на передающей (δP_s) и приемной (δP_r) системах в зависимости от количества каналов и уровня передаваемой мощности через устройство при двух вариантах закона управления

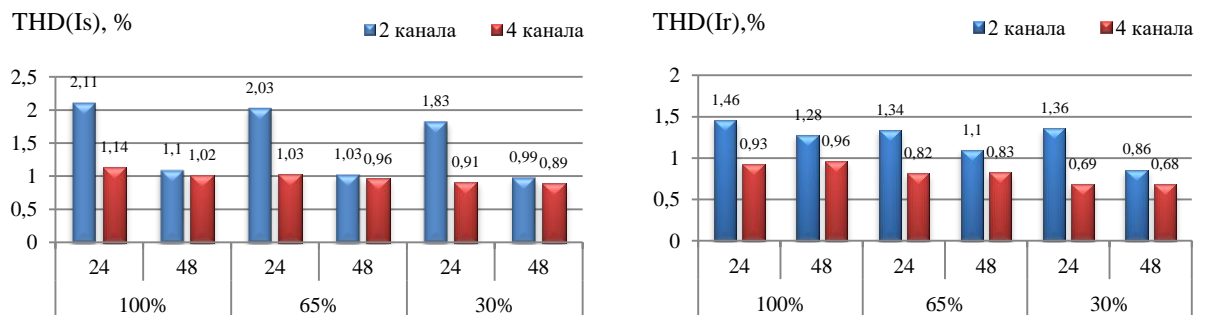


Рис. 5.14 Гистограммы коэффициентов гармонических искажений тока на передающей ($THD(I_s)$) и приемной ($THD(I_r)$) системах в зависимости от количества каналов и уровня передаваемой мощности через устройство при двух вариантах закона управления

На основании полученных гистограмм можно сделать следующие выводы:

- степень стабильности передаваемой мощности на передающей (δP_s) системе указывает на преимущество двухканальной схемы по отношению к четырехканальной схеме. На приемной (δP_r) системе результат носит противоположный характер и указывает на целесообразность применения четырехканальной схемы. Наряду с этим степени стабильности передаваемой мощности на передающей (δP_s) и приемной (δP_r) системах при 24 и 48 позиционном секционировании отличаются незначительно (рис.5.13);

- величина коэффициента гармонических искажений токов на передающей $THD(I_s)$ системе при двухканальной схеме устройства зависит от варианта позиционного

секционирования обмоток «тонкого» управления. Так, согласно рис. 5.14, при 48 позиционном секционировании коэффициент гармонических искажений токов в два раза меньше по отношению к 24 позиционному;

- величина коэффициента гармонических искажений токов на приемной $THD(I_r)$ системе так же указывает на преимущество 48 позиционного секционирования при двухканальном исполнении устройства, но не имеет столь значительного эффекта как на передающей системе, (рис. 5.14);

- величина коэффициента гармонических искажений токов на передающей системе $THD(I_s)$ при 48 позиционном секционировании указывает на то, что качество преобразования не зависит от количества каналов и от уровня передаваемой мощности через устройство, а на приемной системе $THD(I_r)$ 48 позиционное секционирование зависит от количества каналов и от уровня передаваемой мощности через устройство, но незначительно.

- проведенный сравнительный анализ доказывает преимущество четырехканальной схемы преобразования в сочетании с 48 позиционным секционированием обмотки управления.

5.3 Исследование характерных режимов работы устройства при организации асинхронной управляемой межсистемной связи

Исследование характерных режимов работы устройства выполнялось на основе структурно-имитационной модели преобразователя с 48 позиционным секционированием, так как ранее проведенные эксперименты показали преимущество данного закона управления. Процесс исследования включал проведение следующих экспериментов: трехфазное короткое замыкание на одном из каналов с последующим переходом преобразователя частоты в трех и двухканальный режим работы; трехфазное короткое замыкание на шинах приемной системы; трехфазное короткое замыкание на шинах исследуемого устройства со стороны приемной системы и со стороны передающей системы.

При проведении вычислительных экспериментов соблюдались следующие условия:

- расчетное время моделирования $t = 2$ секунды;
- напряжение приемной и передающей систем $U_s = U_r = 230V$;
- положительным, принято направление передачи мощности от передающей (S) энергосистемы к приемной (R);

- величина передаваемой мощности, через исследуемое устройство, соответствовала 100% и 65% от номинальной мощности устройства;
- соотношение частот передающей и приемной систем принято 60-50 Гц;
- соотношение мощностей передающей и приемной систем принято 1:1;
- параметры структурно-имитационных моделей приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя.

Для проведения анализа работы статического преобразователя по схеме «шестиугольник» учитывались следующие параметры:

- степень стабильности 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;
- длительность переходного процесса после отключения повреждения, вызвавшего возмущением в электрической сети t_{np}, c .

Эксперимент при коротком замыкании на одном из каналов проводился по следующему сценарию. В момент времени $t_1 = 0,8 c$ возникает трехфазное короткое замыкание на втором канале устройства. Время $t_2 = 1 c$, соответствует времени отключения поврежденного канала коммутационными аппаратами и устройство переходит к трехканальной схеме работы, а при наступлении времени $t_3 = 1,6 c$ устройство переходит к двухканальной схеме. Эксперимент выполнялся при соблюдении уровня передаваемой мощности соответствующего 100% и 65% от номинальной мощности преобразователя, при работе устройства на активную нагрузку (рис. 5.15 а) и через 30° ЛЭП при обеспечении асинхронной УМС (рис. 5.15 б) переменного тока.

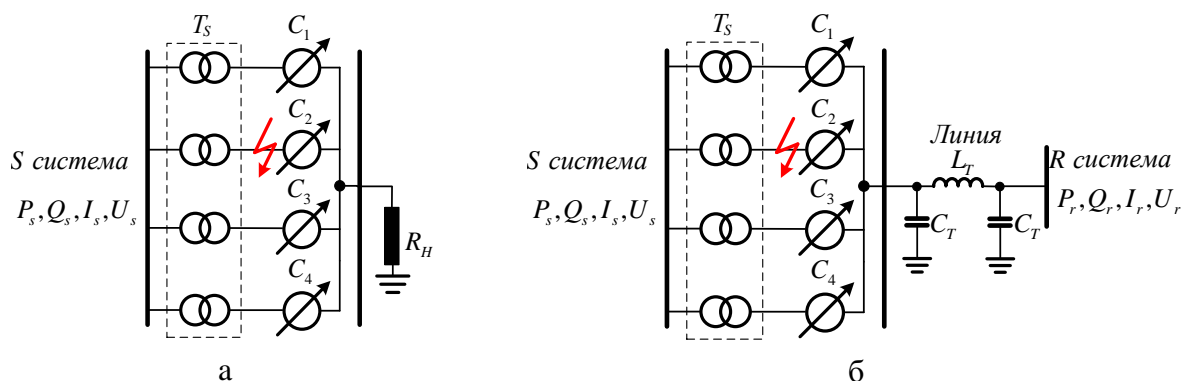


Рис. 5.15 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на одном из каналов
 а – при работе устройства на активную нагрузку;
 б – при работе устройства через 30° ЛЭП при связи двух асинхронно работающих систем

Осциллограммы уровня передаваемых мощностей во время работы устройства при различном количестве одновременно работающих каналов приведены в приложении А8 на рис. А8.25-А8.28 при работе устройства на активную нагрузку, а на рис. А8.29-А8.32 через 30° ЛЭП при обеспечении асинхронной УМС переменного тока.

Гистограммы, характеризующие результаты экспериментов, проводимых согласно схемам рис.5.15, при работе устройства на активную нагрузку представлены на рис. 5.16 и 5.17, а через 30° ЛЭП при обеспечении асинхронной УМС на рис. 5.18 и 5.19.

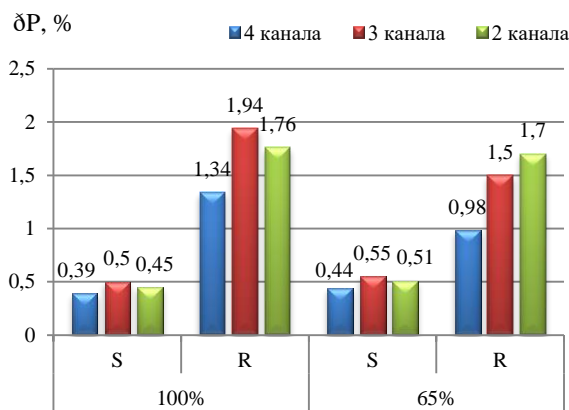


Рис. 5.16 Гистограмма степеней стабильности передаваемой мощности на передающей и приемной системах при работе устройства на активную нагрузку

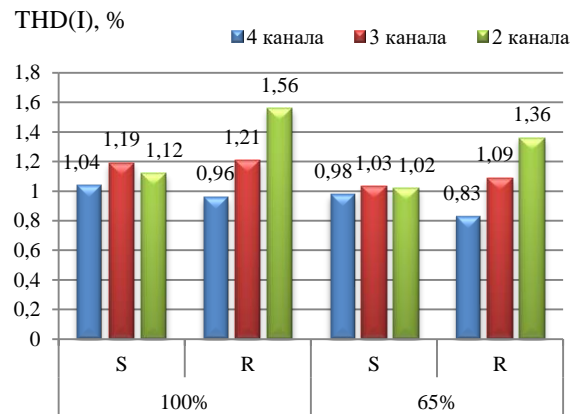


Рис. 5.17 Гистограмма коэффициентов гармонических искажений тока на передающей и приемной системах при работе устройства на активную нагрузку

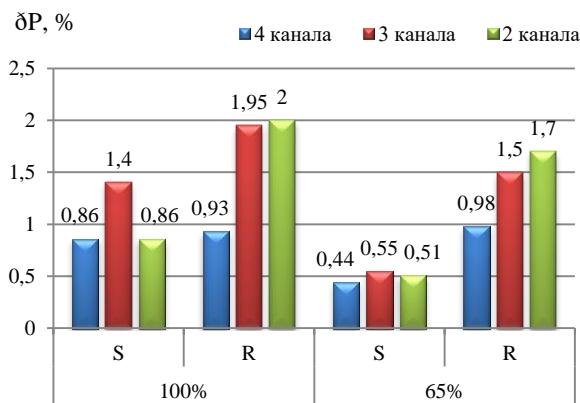


Рис. 5.18 Гистограмма степеней стабильности передаваемой мощности на передающей и приемной системах при работе устройства через 30° ЛЭП

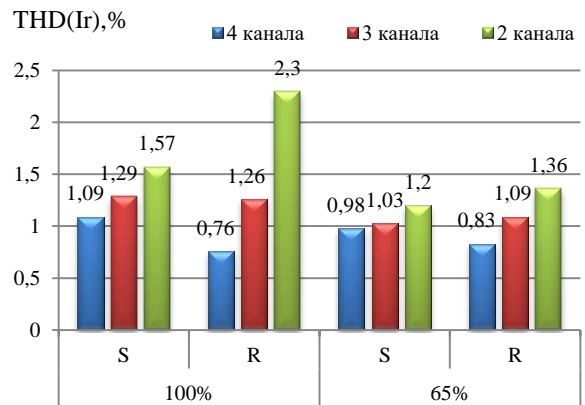


Рис. 5.19 Гистограмма коэффициентов гармонических искажений тока на передающей и приемной системах при работе устройства через 30° ЛЭП

Анализ результатов вычислительных экспериментов позволяет сделать следующие выводы:

- при работе преобразователя на активную нагрузку степень стабильности передаваемой мощности и коэффициент гармонических искажений на передающей системе

остаются практически неизменными при изменении количества работающих каналов и уровня передаваемой мощности (рис. 5.16 – 5.17);

- количество работающих каналов оказывает влияние на режимные показатели приемной системы. Так уменьшение количества одновременно находящихся в работе каналов, а также уровень передаваемой мощности приводит к увеличению степени стабильности передаваемой мощности и коэффициента гармонических искажений (рис. 5.16 – 5.19), но несмотря на это указанные показатели удовлетворяют требованиям стандарта по поддержанию качества электроэнергии;

- гистограммы, представленные на рис. 5.16 – 5.19 указывают на то, что устройство, при изменении количества работающих каналов позволяет, удерживать режимные показатели в части степени стабильности передаваемой мощности и коэффициента гармонических искажений в допустимых пределах при перегрузке устройства;

- полученные гистограммы позволяют сделать вывод о возможности создания стандартизированного образца преобразователя и обеспечении его серийного производства, что впоследствии позволит снизить стоимость устройств такого типа.

Схема проведения эксперимента при возникновении короткого замыкания на шинах приемной системы представлена на рис. 5.20, а на шинах исследуемого устройства со стороны приемной и передающей системы представлены в приложении А8 рис. А8.33 и А8.38 соответственно.

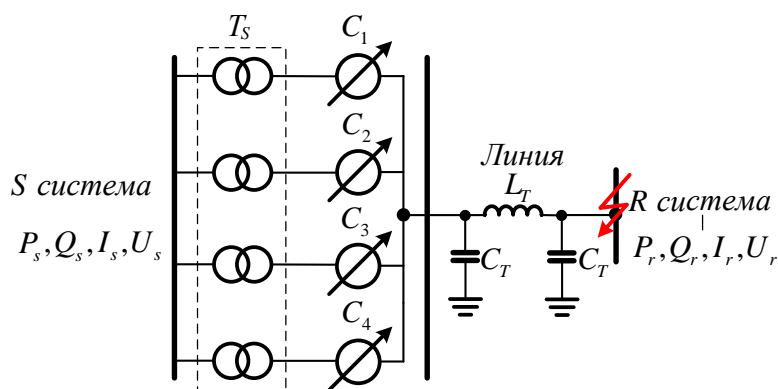


Рис. 5.20 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах приемной системы

Процесс проведения вычислительных экспериментов включал следующую последовательность этапов структурно - имитационного моделирования: в начальный момент времени устройство работает в четырехканальном режиме и обеспечивает асинхронную УМС переменного тока, в момент времени t_1 возникает трехфазное короткое замыкание,

через время t_2 происходит ликвидация повреждения без отключения УМС и система восстанавливает режим и стабилизирует колебания мощности.

Осциллограммы токов на передающей и приемной системах в момент отключения тока короткого замыкания представлены на рис. 5.21 и 5.22 соответственно, а на рис. 5.23 и 5.24 приведены характеристики режима передачи мощности через УМС в переходных процессах.

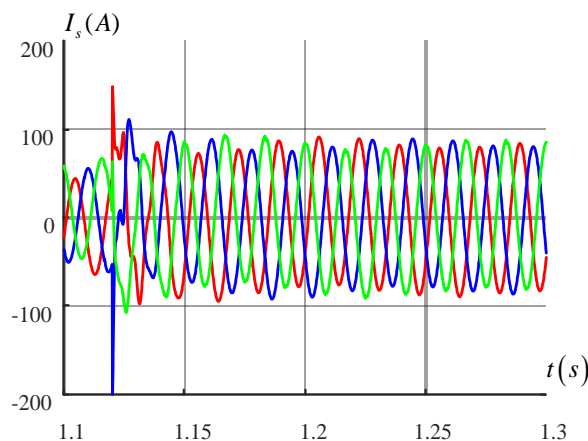


Рис. 5.21 Ток на передающей системе в момент отключения короткого замыкания

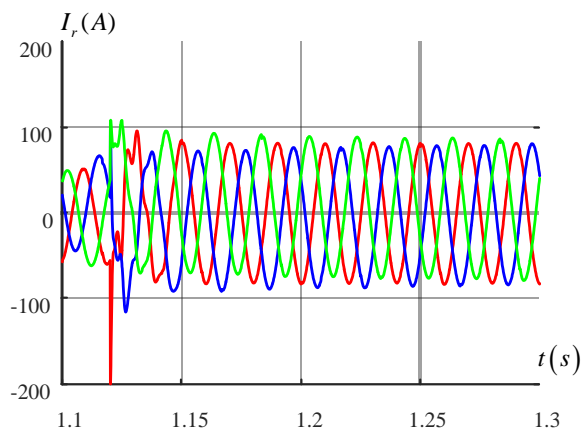


Рис. 5.22 Ток на приемной системе в момент отключения короткого замыкания

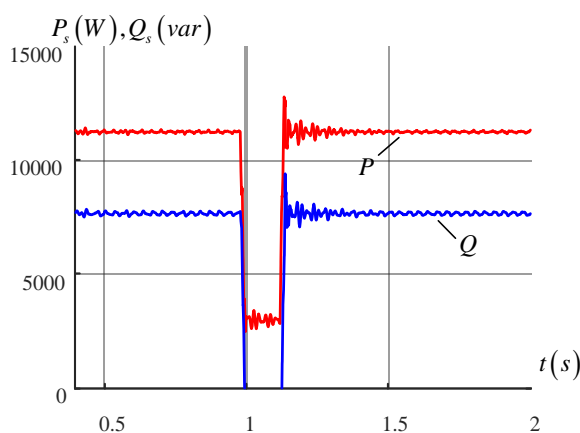


Рис. 5.23 Мощности на передающей системе

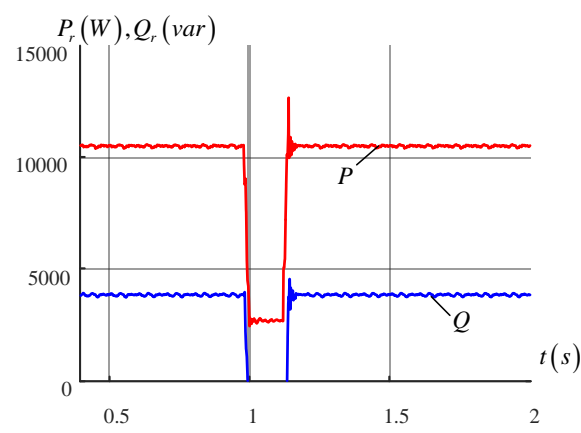


Рис. 5.24 Мощности на приемной системе

Результаты вычислительных экспериментов при возникновении короткого замыкания на шинах исследуемого устройства со стороны приемной и передающей системы сведены в Приложении А8 на рис. А8.34 – А8.37 и рис. А8.39 – А8.42 соответственно.

Анализируя полученные результаты работы устройства при характерных режимах можно прийти к следующим выводам:

- после отключения возмущения вызванного током короткого замыкания рассматриваемое устройство восстанавливает режимные параметры до значений соответ-

ствующих нормальному режиму работы устройства за время, не превышающее 0,2 с, причем время восстановления не зависит от месторасположения места повреждения;

- процесс восстановления режима по передаче мощности на передающей системе происходит за интервал времени не превышающий 0,2 с в отличие от приемной системы, где процесс восстановления происходит практически мгновенно и не зависит от удаленности места повреждения.

Выводы по пятой главе

1. Предложено устройство, позволяющее обеспечить асинхронную УМС переменного тока посредством кругового вращения фазы напряжения без разделения процесса согласования на поочередную работу каналов. Данное техническое решение позволяет организовать многоканальную схему устройства, значительно улучшающую качество преобразования при работе устройства.

2. Сравнительный анализ результатов проведенных экспериментов показал преимущество 48 позиционного секционирования, что позволяет обеспечить, стабильные характеристики преобразования, независящие от количества одновременно находящихся в работе каналов и уровня передаваемой мощности. Степень стабильности передаваемой мощности и коэффициент гармонических искажений при двух и четырехканальной схеме работы устройства на передающей системе изменяются от 0,31% до 0,61% и от 0,89% до 1,1% соответственно, а на приемной системе от 0,56% до 1,46% и от 0,68% до 1,28% соответственно.

3. Результаты исследования режимов работы устройства показали, что независимо от места возникновения возмущения и его местоположения от преобразователя частоты, а так же от количества одновременно находящихся в работе каналов устройства, время восстановления режима после устранения возмущения не превышает 0,2 с, что соответствует характеристикам электромашинных преобразователей.

4. Исследование работы устройства при разном количестве одновременно находящихся в работе каналов показало, что представленный преобразователь позволяет обеспечить стабильное качество преобразования. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о возможности взаимозаменяемости отдельных элементов исследуемого устройства, что позволяет повысить надежность асинхронной УМС переменного тока, а также обеспечить проведение текущих и капитальных ремонтов устройства и опробование работы каждого отдельного канала без нарушения работы УМС.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В диссертационной работе обобщены существующие способы обеспечения асинхронной УМС и представлена возможность решения научно-технической проблемы организации асинхронной УМС переменного тока на основе предложенных схемных вариантов статических трансформаторных преобразователей частоты.

Основные теоретические и расчетно – экспериментальные результаты работы заключаются в ниже следующем:

1. Исследования в области существующих способов организации асинхронной УМС переменного тока показали, что разработанное и физически реализованное устройство VFT, компании «General Electric», а также теоретически и экспериментально исследованный промышленный образец АС ЭМПЧ не позволяют обеспечить согласование двух асинхронно работающих энергосистем, скольжение по частоте которых более ± 3 Гц.

2. Предложены математические модели преобразовательных устройств на основе источников неизменного тока, а так же на основе статических трансформаторов доказывающие возможность реализации принципа кругового преобразованием фазы выходного напряжения.

3. Разработаны электрические схемы и структурно – имитационные модели устройств с целью проведения экспериментальных исследований в статических и динамических состояниях работы преобразователей, позволяющих дать оценку качества процесса преобразования.

4. Определены законы управления статическим преобразователем частоты на основе источников неизменного тока, позволяющие обеспечить заданную величину и направление передаваемой мощности в процессе согласования частоты путем деления сопряженных проводимостей на элементарные модули.

5. Показано, что преобразователь частоты на основе источников неизменного тока позволяет обеспечить УМС двух синхронно работающих систем, но с разными стандартами по поддержанию частоты. Применение гармонических фильтров и демпферов позволило улучшить коэффициент гармонических искажений на передающей системе с 7,02% до 4%, а на приемной системе с 8,31% до 5,07%. Полученные значения удовлетворяют требованиям стандарта IEEE-519.

6. Разработаны схемные варианты статических преобразователей частоты трансформаторного типа, реализующие принцип кругового вращения фазы выходного

напряжения. Предложены законы «грубого» и «тонкого» управления, позволяющие осуществлять процесс преобразования с различной степенью дискретности.

7. Показано, что предложенные схемные варианты статических трансформаторов с круговым преобразованием фазы выходного напряжения и закон управления с дискретностью ступени переключения $2,5^\circ$ позволяют обеспечить УМС переменного тока асинхронно работающих энергосистем, частота скольжения которых находится в диапазоне ± 10 Гц без применения гармонических фильтров и демпферов.

8. Выявлено, что при отклонениях от нормального режима работы сети, таких как наброс и сброс нагрузки или возмущения вызванные током короткого замыкания, рассматриваемый тип устройств восстанавливает режимные параметры до значений соответствующих нормальному режиму работы устройства за время, не превышающее 0,2 с, причем время восстановления не зависит от удаленности места повреждения.

9. Показана возможность применения принципа многоканальности на статических трансформаторных преобразователях. Данный принцип позволяет обеспечить резервирование каналов устройства, проведение текущих и капитальных ремонтов, опробование работы каждого отдельного канала без нарушения работы УМС, что может оказать положительный эффект в части надежности организации УМС переменного тока двух асинхронно работающих энергосистем.

10. Результаты исследования показали, что предлагаемые типы статических преобразователей частоты структурно напоминают и решают большинство задач, характерных для ВПТ «Вставка постоянного тока» или «Back-to-Back DC Link». Таким образом, по аналогии, предлагаемые устройства могут быть названы «Вставка переменного тока» или «Back-to-Back AC Link».

Результаты исследования подтверждены шестью основными публикациями и доложены на трех конференциях.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Алексеев Б.А., Шакарян Ю.Г. “Испытания вращающегося трансформатора типа VFT для связи несинхронно работающих энергосистем” Электро. электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность Издательство: Холдинговая компания “Электрозавод” (Москва) №3 2005, ст. 7-10.
- [2] Асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты типа АС ЭМПЧ-200 УХЛ4. Технический проект ИАВК.565712. 001.НИИ и завод «Электротяжмаш», Харьков, 1982.
- [3] Асинхронизированный электромеханический преобразователь частоты типа АС ЭМПЧ-1М. Технический проект ТХ114Б-100ПЗ, НИИ завода «Электротяжмаш», Харьков, 1987.
- [4] Баринов В.А., Исаев В.А., Лисицын Н.В., Маневич А.С., Усачев Ю.В., “Развитие электроэнергетики и единой национальной электрической сети России (долгосрочная перспектива)”, ЭНЕРГИЯ ЕДИНОЙ СЕТИ №2 (31) АПРЕЛЬ - МАЙ 2017, 50 - 60 с.
- [5] Батенин В.М., Бушуев В.В., Воропай Н.И., ”Инновационная электроэнергетика-21”, Москва ИЦ "Энергия", 2017. 584 с. ISBN (print): 978-5-98908-457-9.
- [6] Волкова В. Н., Денисов А. А., “Теория систем и системный анализ”, учебник для академического бакалавриата, 2-е изд., перераб. и доп. М., Издательство Юрайт, 2014 г., 616 с.
- [7] Дементьев Ю.А., Сокур П.В., Шакарян Ю.Г., Майоров А.В., Шабаш А.М., Ярош Д.Н., Пинчук Н.Д., Третьяков В.С., “Электромеханическая вставка переменного тока для управления режимами и ограничения токов короткого замыкания”, Энергия единой сети №4 (33) август — сентябрь 2017 18-27с.
- [8] Демидова М.В., Семина И.А., Бабич Н.А. “Асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты” В сборнике: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ материалы Международной научно-практической конференции. 2017. С. 346-348.
- [9] Едророва В.Н., Овчаров А.О., “Система методов в научных исследованиях” Экономический анализ: теория и практика, № 10 (313), 2013, pp. 33-47
- [10] Зеленохат Н.И., Шаров Ю.В. “Новые технологические решения проблемы совместной работы энергообъединений востока и запада” Электричество. 2007. № 9. С. 34-40.

- [11] Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И., “Варианты развития транспортной сети Молдовы при параллельной работе с энергосистемой Украины”, *Problemele energeticii regionale*. nr.1(18)2012, с. 24-34
- [12] Калинин Л.П., Зайцев Д.А., Голуб И.В., Калошин Д. Н., “Управление режимом параметрического регулятора мощности типа UIPC (Unified Interphase Power Controller) с использованием электромеханического преобразователя”, *Проблемы региональной энергетики*. Издательство: Институт энергетики Академии наук Молдовы (Кишинев), 2015 № 3 (29). С. 18-24. ISSN: 1857-0070 eISSN: 1857-0070 <http://journal.ie.asm.md/ru/home>
- [13] Калинин Л.П., Зайцев Д.А., Тыршу М.С., Голуб И.В., Калошин Д.Н., Погорлецкий В.М., “Характеристики статического преобразователя частоты, выполненного по схеме «зигзаг-треугольник»”, *Problemele Energeticii Regionale* 1 (45) 2020 *Electro-energetica* pp. 31-41 , ISSN 1857-0070 1 (36) 2018, DOI: 10.5281/zenodo.3713403 (THOMSON).
- [14] Калошин Д., “Моделирование электромашинного преобразователя частоты в SIMPOWERSYSTEMS”, 10-я Международная конференция “Математическое моделирование в образовании, науке и производстве”, 28-30 сентября 2017 года г. Тирасполь
- [15] Калошин Д.Н., “Способ определения режимных характеристик преобразователя частоты, использующего технологию Interphase Power Controller”, *Problemele Energeticii Regionale*, ISSN 1857-0070 1 (36) 2018, DOI: 10.5281/zenodo.1217278 (THOMSON);
- [16] Кирпиченкова В.Я. “Влияние канала регулирования мощности асинхронизированного синхронного электромеханического преобразователя частоты на стохастическую устойчивость межсистемной гибкой связи” *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2008. № 2. С. 69-71.
- [17] Колмогоров Ю. Н., Сергеев А. П., Тарасов Д. А., Арапова С. П.,” *Методы и средства научных исследований*”, учеб. Пособие, Екатеринбург Изд-во Урал. ун-та, 2017г. 152 с.
- [18] Кощев Л.А., Шлайфштейн В.А. *Характеристики и область применения устройств с использованием преобразователей напряжения в системах электропередачи.* — *Электричество*, 2003, № 8.

- [19] Луковенко А.С., “Анализ отечественного и мирового опыта применения управляемых электропередач переменного тока в интеллектуальных электрических сетях”, Энергия единой сети № 5 (41) октябрь — ноябрь 2018 30 – 38 с.
- [20] Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология научного исследования. – М.: Либроком. 2010г. 280 с.
- [21] Пономарев А.Б., Пикулева Э.А. “Методология научных исследований”, учебное пособие, Пермь, Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014 г. 186 с.
- [22] Проект HVDC соединения Эфиопия – Кения
https://mobile.ruscable.ru/news/2020/4/6/Projekt_HVDC_soedineniya_Efiopiya_-_Keniya_dolzhen/
- [23] Прокопенко С.А. “Асинхронизированный электромеханический преобразователь частоты” В сборнике: Актуальные вопросы энергетики Материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов. 2016. С. 168-172.
- [24] Прохорова И.А., “Теория систем и системный анализ: учебное пособие”, Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013 г. 49 с.
- [25] Пустынникова Е.В., ”Методология научных исследований: учебное пособие для учреждений высшего образования”, Ульяновск, УлГУ, 2017г. 130 с.
- [26] Рябин Т.В., Сорокин Д.В., “ Тенденции развития технологии глобальных электрических сетей (по итогам международной конференции «технологии глобальных энергетических сетей)», ЭНЕРГИЯ ЕДИНОЙ СЕТИ № 2 (44) АПРЕЛЬ - МАЙ 2019 64 - 73 с.
- [27] Саркисян В.В., Цгоев Р.С., Мирошников И.Ю., Шакарян Ю.Г. “Устройство для управления асинхронизированным электромеханическим преобразователем частоты” Авторское свидетельство SU 1510047, 23.09.1989. Заявка № 4279792 от 09.07.1987.
- [28] Сулова О.В., Травин Л.В.,” Тенденции развития технологий передачи электроэнергии постоянным током (по материалам международного коллоквиума 2017 СИГРЭ А3, В4 И D1)”, Энергия единой сети № 1 (36) февраль - март 2018, 48-58 с.
- [29] Цгоев Р.С. “ Несинхронная параллельная работа ОЭС Сибири и Востока” ЭЛЕКТРО электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1/2004, 2-6.

- [30] Энергетическая Стратегия Республики Молдова до 2030 года. (МОН№27-30, st.№146, 05.02-2013).
- [31] ABB High Voltage Direct Current
https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/eventos/jornadas-tecnicas-chile-2019/pgtr-y-pggi/maxwell-pinto-abb-hvdc-chile.pdf?sfvrsn=fdbc9715_2
- [32] Amelin A.A. Upravlenie peretokom aktivnoj moshchnosti po neodnorodnoj mezhsistemnoj 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).
- [33] Amirnaser Yazdani, Iravani Reza, “Voltage-Sourced Converters in Power Systems”, Wiley-IEEE press, 2010
- [34] Axelsson U., Holm A., Liljergen C., Aberg M., Erikson K., Tollerz O. The Gotland HVDC Light-Experiences from trial and commercial operation. Presented at CIRED conference, Amsterdam, The Netherlands, June 18-23, 2001.
- [35] Bakhsh F. I., Islam S. and Khursheed M., “Modeling, Analysis and Simulation of VFT for Power Flow Control through Asynchronous Power Systems,” ACEEE Int. J. on Electrical and Power Engineering, Vol. 02, No. 03, pp. 4-8, Nov 2011.
- [36] Bakhsh F. I. , “VFT Application for Asynchronous Power Transfer,” ACEEE Int. J. on Control System and Instrumentation, Vol. 4, No. 1, pp. 1-7, Feb 2013.
- [37] Bakhsh F. I., Irshad M., and Islam S., “New Model Variable Frequency Transformer (NMVFT) – A Technology for V/f Control of Induction Motors”, ACEEE Int. J. on Electrical and Power Engineering, Vol. 02, No. 01, pp. 11-15, Feb 2011
- [38] Bakhsh F. I., Irshad M., Asghar M. S. J., “Modeling and Simulation of Variable Frequency Transformer for Power Transfer in-between Power System Networks,” Indian International Conference on Power Electronics (IICPE), Delhi, India, 28-30 Jan., 2011.
- [39] Bakhsh F. I., Dheeraj K. K., “Digital Simulation of VFT Applications between Power System Networks”, Association of Computer Electronics and Electrical Engineers, 2013
- [40] Balyberdin L. L. i dr. “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).
- [41] Beauregard F., Brochu J., Morin G., Pelletier P.,”Interphase Power Controller with Voltage Injection”, IEEE Transactions PWRD, Vol. 9, No. 4, October 1994, pp. 833-841.

- [42] Breuer W., Hartmann V., Povh D., Retzmann D., Teltsch E., "Application of HVDC for large power system interconnections". B4-106, Session 2004, CIGRÉ
- [43] Brochu J., Pelletier P., Beaugard F., Morin G., "The Interphase Power Controller-A New Concept for Managing Power Flow Within AC Networks", IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9, No. 2, April 1994.
- [44] 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.
- [45] 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&DLA), Lima, 2018, pp.1-5. doi: 10.1109/TDCLA.2018.8511758.
- [46] Clark K., Price W. W., and Reichard M. L., "Linden VFT System Reliability Impact Study," for East Coast Power, L.L.C., Schenectady, NY, USA, Revision 2, March 8, 2006
- [47] Climate Institute (USA), "North American Supergrid", Retrieved 26 January 2020. http://climate.org/wp-content/uploads/2019/09/supergrid_9_2019.pdf
- [48] Colak I., "Introduction to smart grid", 2016 International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP), Istanbul, 2016, pp. 1-5.
- [49] Czisch G., Gregor G. "Realisable Scenarios for a Future Electricity Supply based 100% on Renewable Energies", Institute for Electrical Engineering – Efficient Energy Conversion. University of Kassel, Germany and Riso National Laboratory, Technical University of Denmark. Retrieved 15 October 2008 186 - 195 pp. https://web.archive.org/web/20140701230913/http://www.risoe.dk/rispubl/reports/ris-r-1608_186-195.pdf
- [50] Dan Wang, Chengxiong Mao, Jiming Lu, Huibo Lou, "General Aspects and Fundament of Variable Frequency Electric Power Transmission Part I: Theory", PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 8/2012
- [51] Demidova M.V., Semina I.A., Babich N.A. Asinhronizirovannyj sinhronnyj ehlektromekhanicheskij preobrazovatel' chastoty. [Asynchronized synchronous electromechanical frequency converter]. Aktual'nye voprosy ehnergetiki materialy Mezhdunarodnoj nauchnoprakticheskoy konferencii. 2017 Izdatel'stvo: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet pp: 346-348 (In Russian).

- [52] 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.
- [53] Doyon P., McLaren D., White M., Li Y ., Truman P., Larsen E., Wegner C., Pratico E., Piwko R., "Development of a 100 MW Variable Frequency Transformer," Canada Power, Toronto, Ontario, Canada, September 28-30, 2004.
- [54] Dusseault M., Gagnon J. M., Galibois D., Granger M., McNabb D., Nadeau D., Primeau J., Fiset S., Larsen E., Drobniak G., McIntyre I., Pratico E., Wegner C., "First VFT Application and Commissioning," Canada Power, Toronto, Ontario, CANADA, September 28-30, 2004.
- [55] Elamari K., Lopes L.A.C.,"Comparison of phase shifting transformer and unified power flow control based interphase power controllers" 2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), December 2016, pp. 1–6.
- [56] Elamari K., Lopes L.A.C.,"Comparison of Static Phase Shifter and Unified Power Flow Controller-Based Interphase" Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 40, Issue – 2, August 2017, pp. 139–148.
- [57] 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.
- [58] Farmad M., Farhangi S., Afsharnia S., Gharehpetian G. B.," Application of voltage source converter in Interphase Power Controller for power flow control and fault limitation" 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, January 2009, pp. 2301–2306
- [59] Farmad M., Farhangi S., Afsharnia S., Gharehpetian G.B.,"Modelling and simulation of voltage source converter-based interphase power controller as fault-current limiter and power flow controller" IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 5, Issue – 11, November 2011, pp. 1132–1140.
- [60] Feng Gao, K. Strunz,"Modeling of constant distributed parameter transmission line for simulation of natural and envelope waveforms in power electric networks", Power Symposium, 2005. Proceedings of the 37th Annual North American, December 2005, pp. 247–252.
- [61] Firouzi Mehdi, Gharehpetian Gevork B., Salami Younes,"Active and reactive power control of wind farm for enhancement transient stability of multi-machine power system

- using UIPC” IET Renewable Power Generation, Vol. 11, Issue – 8, July 2017, pp. 1246–1252.
- [62] 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.
- [63] Funaki T., Matsuura K., “Feasibility of the low frequency AC transmission”. Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, Jan. 2000. pp. 2693-2698.
- [64] Gagnon J., Galibois D., McNabb D., Nadeau D., Paquette P., Larsen E., McLaren D., Piwko D., Wegner C., Mongeau H., “A 100 MW Variable Frequency Transformer (VFT) on the Hydro-Québec Network,” A2-208 Presented at the CIGRE Session, Paris, France, 2006.
- [65] Global Energy Interconnection (GEIDCO) “GEIDCO development strategy”, Retrieved 26 January 2020. <https://en.geidco.org/aboutgei/strategy/>
- [66] Grünbaum R., Petersson A., and Thorvaldsson B., “FACTS, improving the performance of electrical grids,” ABB Rev., pp. 11–18, Mar. 2003.
- [67] Hassink P., Marken P. E., O’Keefe R. and Trevino G. R., “Improving Power System Dynamic Performance in Laredo, TX,” presented at the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Expo, Chicago, IL, April 21-24, 2008.
- [68] High Voltage Direct Current Systems General Electrical
https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/powerd_vtf/hvdc-systems_gea-31971_lr.pdf
- [69] Issarachai Ngamroo, “A Stabilization of Frequency Oscillations in a Parallel AC-DC Interconnected Power System via an HVDC Link” ScienceAsia 28 (2002) : 173-180
- [70] 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.
- [71] Juan Li, Naixin Yan, Ying Yue, Hanxu You, “Designing of PI controller of thyristor controlled interphase power controller for improving transient stability of power system” 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, October 2011, pp. 2154–2157.
- [72] Junjie Zhu, Qinsong Qian, Shengli Lu, Weifeng Sun, Haojie Tian, “A Phase-shift Triple Full-bridge Converter with Three Shared Leading-legs”, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol PP, November 2017, pp. 1- 1.

- [73] 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.
- [74] Kalinin L., Zaitsev D., Tyrshu M. “Innovative variant of phase shifting transformer (PST)”, International World Energy System Conference, Iasi, Romania, 30 Iunie-2 July , 2008/ Session I – Transmission and distribution system analysis, planning and operation. -4 p
- [75] Kalinin L.P., Zaitsev D.A., Tirsu M.S., Caloşin D.N., Lazaroiu G.C., “The interphase power controller. Static and dynamic aspects”, Collection of works 8TH International Conference on Energy and Environment, CIEM 2017 Bucharest, 19-20 october 2017 r. Proceedings of 8th International Conference on Energy and Environment: Energy Saved Today is Asset for Future, CIEM 2017 8, Energy Saved Today is Asset for Future. 2018. c. 87-91. DOI: 10.1109/CIEM.2017.8120843, (SCOPUS);
- [76] Kalinin L.P., Zaitsev D.A., Tirsu M.S., Caloşin D.N., The new variant of adaptive inter-phase power controller with a wide range of controllability. Collection of works 7TH International Conference on Modern Power Systems, MPS 2017 Cluj-Napoca, 06-09 june 2017 r. Proceedings - 2017 International Conference on Modern Power Systems, MPS 2017 7. 2017. c. 7974381. DOI: 10.1109/MPS.2017.7974381, (SCOPUS);
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] Larsen E., Piwko R., McLaren D., McNabb D., Granger M., Dusseault M., Rollin L-P., Primeau J., “Variable Frequency Transformer - A New Alternative for Asynchronous Power Transfer”, Canada Power, Toronto, Ontario, Canada, September 28-30,2004.
- [80] Li X.N., Li T., Wang J.F., Hu T., “Impacts of ± 800 kV DC Power Transmission From Yunnan to Guangdong on Stability of China Southern Power Grid”, Power System Technology, vol. 33 n. 20, October 2009, pp. 21-26. (in Chinese)
- [81] 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.

- [82] Mandeng Jean Jacques, Kom Charles Hubert, Mbihi Jean,” Modeling and Simulation of an Electric Power Transmission Line Under Asymmetric Compensation by Dual Inter-Phase Power Controllers”, International Journal on Energy Conversion (IRECON), Vol 3, No 4, 2015, pp. 111- 119.
- [83] Map ENTSO-E <https://www.entsoe.eu/data/map/>
- [84] Marczewski J. J., “VFT Applications Between Grid Control Areas,” presented at the IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, June 26-28, 2007.
- [85] Marczewski J. J., “VFT Interconnection Study Process with ISOs/RTO sand Grid Manag-ers/Operators”, presented at the IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, June 26-28, 2007.
- [86] Marken P. E., “Variable Frequency Transformer – A Simple and Reliable Interconnec- tion Technology,” presented at EPRI HVDC Conference, Denver, CO, September, 13- 14, 2007
- [87] Marken P. E., Marczewski J. J., D'Aquila R., Hassink P., Roedel J. H. and Bodo R. L.,”VFT - a smart transmission technology that is compatible with the existing and future grid”, 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, 2009, pp. 1-7, doi: 10.1109/PSCE.2009.4840083.
- [88] Merkhouf A., Doyon P. and Upadhyay S., “Variable Frequency Transformer—Concept and Electromagnetic Design Evaluation,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 4, December 2008, pp. 989-996.
- [89] 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.
- [90] Mohammadi M., Gharehpetian G. B.,”Thyristor controlled interphase power controller modeling for power system dynamic studied” TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference, Vol. 3, May 2005, pp. 355–358
- [91] Mohammed Amarullah S., Hameed Shaik,”Improving power line utilization and performance with FACTS devices in disturbed power systems”, International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication, vol-1, Issue-10, Dec-2013 pp. 17-20.
- [92] Mostafa E., Hossein Z.,”Flexible Interconnection in Energy Systems via Variable Frequency Transformer”, Majlesi Journal of Energy Management, Vol. 8, No. 3, September 2019, pp. 45-53.

- [93] Nadeau D., "A 100-MW Variable Frequency Transformer (VFT) on the Hydro-Québec Trans Énergie Network – The Behavior During Disturbance," presented at the IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, June 26-28, 2007
- [94] 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.
- [95] Narain G .Hingorani. High-Voltage DC Transmission: A Power Electronics Workhouse.-IEEE Spectrum, April 1996.
- [96] Osipov D.A. "Ways to suppress harmonics in power supply system's", Krasnoyarsk, Siberian Federal University, April 15-25, 2016, pp. 49-52. (In Russian).
- [97] Pejovic P., Maksimovic D.A," Method of fast time-domain simulation of Networks and Switches", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 9, N 4, p. 449–456, July, 1994.
- [98] Pierre Couture, Senior Member, IEEE, Jacques Brochu, Senior Member, IEEE, Gilbert Sybille, Pierre Giroux, Alpha Oumar Barry, "Power Flow and Stability Control Using an Integrated HV Bundle-Controlled Line-Impedance Modulator", IEEE Transactions PWRD, Vol. 25, No. 4, October 2010, pp 2940-2949.
- [99] Postolati V., Bîcova E., (Institutul de Energetică al AŞM), Timaşova L., Şakarian Iu. (VNIIEE, Moscova) "Majorarea capacităţii şi gradului de dirijare a liniilor electrice de current alternative", Problemele energeticii regionale., nr.3 2008
- [100] Postolati V., Bykova E., Berzan V., Boshneaga V., Suslov V., Radilov T., "Possible Operation Modes of Moldovan, Ukrainian and Romanian Electrical Power Systems Joint Work", Problemele energeticii regionale. nr.2(28) 2015, p.1-6
- [101] Pourhossein J., Gharehpetian G.B., Fathi S. H.," Unified Interphase Power Controller (UIPC) Modeling and Its Comparison With IPC and UPFC" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, Issue – 4, August 2012, pp. 1956–1963.
- [102] Pourhossein J., Gharehpetianb G.B., Fathib S.H.,"Static Inter-Phase Power Controller (SIPC) modeling for load flow and short circuit studies", Energy Conversion and Management Vol 64, Dec 2012, pp. 145–151.
- [103] POWERGRID Corporation of India Limited (August 2007). "National Power Grid Development Investment Program (Facility Concept): Resettlement Planning Document" https://web.archive.org/web/20090318232733/http://www.adb.org/Documents/Resettlement_Plans/IND/39630/39630-IND-RP.PDF

- [104] Powh D., Weinhold M., “Improvement of Power Quality by Power Electronic Equipment”, CIGRE, paper 13/14/36-06, Paris, 2000.
- [105] Pratico E. R., Wegner C., Larsen E. V., Piwko R. J., Wallace D. R. and Kidd D., “VFT Operational Overview - The Laredo Project”, 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, 2007, pp. 1-6, doi: 10.1109/PES.2007.386187.
- [106] Pratico E. R., Wegner C., Marken P. E. and Marczewski J. J., “First multi-channel VFT application - the Linden project”, IEEE PES T&D 2010, New Orleans, LA, 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/TDC.2010.5484379.
- [107] Project Changji-Guquan UHVDC link <https://www.hitachiabb-powergrids.com/references/hvdc/changji-guquan-uhvdc-link>
- [108] Project DolWin2 <https://powerline.net.in/2017/11/03/hvdc-gaining-ground/>
- [109] Project IFA-2 <https://tyndp.entsoe.eu/tyndp2018/projects/projects/25>
- [110] Project Laredo VFT
<https://web.archive.org/web/20150621212836/http://www.ettexas.com/projects/vft.asp>
- [111] Project North Sea Link <http://northsealink.com/>
- [112] Project North-East Agra UHVDC <https://powerline.net.in/2017/11/01/transmission-superhighway/>
- [113] Project Raigarh-Pugalur <https://www.tdworld.com/overhead-transmission/article/20967567/india-to-build-longest-800kv-uhvdc-transmission-line>
- [114] Project Raigarh-Pugalur HVDC Line <http://www.tndindia.com/raigarh-pugalur-hvdc-line-expected-december-2020/>
- [115] Project Rio Madeira Back-to-back <https://www.nsenergybusiness.com/projects/rio-madeira-transmission-link-amazon-river-basin/>
- [116] Projects Jinping – Sunan <https://www.nsenergybusiness.com/projects/jinping-sunan-transmission-link/>
- [117] Prokopenko S.A. “Asynchronized electromechanical frequency converter”, Topical issues of energy. Materials of the All-Russian scientific conference of students, undergraduates, graduate students. 2016, publishing house Omsk State Technical University, pp. 168-172. (In Russian).
- [118] 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.
- [119] Rajiv K. Varma., “Introduction to FACTS Controllers”, IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. 15-18 March 2009

- [120] Ramesh S., Krishnan A., "A Self –Tuning Fuzzy Logic Controller for a Frequency Stabilization in a Parallel AC – DC Two Area Interconnected Power System". European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.51 No.1 (2011), pp.6-17.
- [121] Rosas-Caro J.C., Ramirez J.M., Peng, F.Z., "Simple topologies for AC-link flexible AC transmission systems", PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, June 28 2009-July 2 2009 , p.1 – 8
- [122] Samadi Afshin, Farhangi Shahrokh, "Analysis, control and modeling of cascaded multilevel converter-based IPC" 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, January 2009, pp. 3213–3218.
- [123] Satyanarayana V.V., Rao. R., S. Rama Reddy, "Digital Simulation of Thyristor Controlled Interphase Power Control Technology (TCIPC) to limit the fault currents", International Journal of Engineering and Technology (IJET), Vol 5 No 3 Jun-Jul 2013.
- [124] Seleznev A.S., "Reducing the level of higher harmonics in electric networks of high voltage", Vestnik IrGTU 2014, №4 (87), pp.143-146. (In Russian).
- [125] Siemens High-Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Solutions
<https://new.siemens.com/global/en/products/energy/high-voltage/high-voltage-direct-current-transmission-solutions.html>
- [126] Sitnikov V., Povh D., Retzmann D., Teltsch E., "Solutions for large power system interconnections", 17. – 19. Sept. 2003, St. Petersburg, CIGRE.
- [127] Tirshu M., Kalinin L., Zaitsev D., Golub I., Spivak V., "The model and characteristics of circular phase convertor", SIEMEN 2015, 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems p.180-184.
- [128] 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, 126 pp.
- [129] Trevino R., "Improving Power System Dynamic Performance in Laredo, TX," presented at the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Expo, Chicago, IL, April 21-24, 2008.
- [130] Wang X.F., Cao C.J., Zhou Z.C., "Experiment on fractional frequency transmission system", IEEE Trans. Power Syst., vol. 21 n. 1, January 2006, pp. 372-377.
- [131] Woodford D., Menyies R.W., "Controlling a Back-to-Back DC Link to Operate as a Phase Shift Transformer", Paper No. 14-202, CIGRE, Paris, August 1994.
- [132] Yi Shan-jun, Yu Ji-lai, Guo Zhi-zhong, "Performances coordination strategies of dynamic controlled inter-phase power controller (DCIPC)" 2004 International

- Conference on Power System Technology, 2004. Power Con 2004. , Vol. 1, July 2005, pp. 367–372.
- [133] 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.
- [134] Zaitsev D., Golub I., Kalinin L., Tirshu M., “Operational regimes of moldavian power system under development of network interconnections”, *Problemele energeticii regionale.*, nr.2(25) 2014 p.22-29
- [135] Zelenohat N.I., Aristov I.S. Analiz staticheskoy ustojchivosti ehnergosistem pri nalichii gibkih mezh sistemnyh svyazey s preobrazovatelnyami chastoty. [Analysis of static stability of power systems in the presence of flexible interconnections with frequency converters] *EHnergetik* Izdatel'stvo: Nauchnotekhnicheskaya firma "EHnergoprogress" (Moskva) 2011, No:4 pp: 27-30. (In Russian).
- [136] 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.
- [137] Zmaznov Eugeny, Lozinova Natalya, Suslova Olga, Andreev Mikhail. Ufa Ruslan. HVDC LCC technology and power quality issues in crossborder electrical power transmission Russia — Finland. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). 2018 doi 10.1109/ISGTEurope.2018.8571805.

Приложение А1. Паспортные данные и расчет параметров схемы замещения

Паспортные даны двигателя АК160М4

Обозначение	P, кВт	η	Cos	p	U, кВ	f	M	Km	n
АК160М4	14	0,885	0,87	2	380	50	3	3.85	1445

Трехфазная система обмоток создает вращающееся магнитное поле с угловой скоростью вращения:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

где

f - частота питающей сети

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314,159$$

Фазное напряжение, В:

$$U_1 = \frac{U}{\sqrt{3}} \qquad U_1 = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,393 \text{ В}$$

Пусковой момент:

$$M_n = \frac{30 \cdot 10^3 \cdot P}{\pi \cdot n}$$

где

P - номинальная мощность двигателя;

n - скорости вращения магнитного поля.

$$M_n = \frac{30 \cdot 10^3 \cdot 14}{\pi \cdot 1445} = 92,519$$

Максимальный момент двигателя:

$$M_{\max} = K_m \cdot M_n$$

где

$k_t = 3,85$ - температурный коэффициент;

$$M_{\max} = 3,85 \cdot 92,519 = 356,199$$

$$s_n = 1 - \frac{p \cdot n}{3000} \qquad s_n = 1 - \frac{2 \cdot 1445}{3000} = 0,037$$

$$I_n = \frac{P \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta \cdot \text{Cos}} \qquad I_n = \frac{14 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,885 \cdot 0,87} = 27,6 \text{ А}$$

Расчет параметров схемы замещения

В классе изоляции «F» для расчета температуры:

$$r_1 = k_t \cdot r_{120}$$

где

$k_t = 1,38$ - температурный коэффициент;

$r_{120} = 0,188$ - сопротивление статора (Кравчик А.Э ст.440).

Реактивное сопротивление короткого замыкания схемы, эквивалентное асинхронному двигателю для режима работы, определяется после максимального крутящего момента по формуле:

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{p \cdot m \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega \cdot M_{\max}} - r_1\right)^2 - r_1^2}$$

где

p - число пар полюсов;

m - число фаз;

U_1 - фазное напряжение на статоре;

ω - угловая скорость вращения двигателя.

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 3 \cdot 219,393^2}{2 \cdot \omega \cdot 356,199} - 0,259\right)^2 - 0,259^2} = 0,998 \text{ Ом}$$

Сопротивление обмотки ротора приведенное к обмотке статора для рабочего режима определяется после номинального крутящего момента и номинального скольжения по формуле:

$$r_2' = \left[\frac{p \cdot m \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega \cdot M_n} - r_1 + \sqrt{\left(\frac{p \cdot m \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega \cdot M_n} - r_1\right)^2 - r_1^2 - x_k^2} \right] \cdot s_n$$

$$r_2' = \left[\frac{2 \cdot 3 \cdot 219,393^2}{2 \cdot \omega \cdot 92,519} - 0,259 + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 3 \cdot 219,393^2}{2 \cdot \omega \cdot 92,519} - 0,259\right)^2 - 0,259^2 - 0,998^2} \right] \cdot 0,037 = 0,3411 \text{ Ом}$$

Расчет сопротивления обмотки ротора

$$u_{c1} = 21$$

$$a_1 = 2$$

$$k_{\text{inf}1} = 0,958$$

$$z_1 = 48$$

$$w_1 = \frac{z_1 \cdot u_{c1}}{2 \cdot a_1 \cdot m}$$

$$w_1 = \frac{48 \cdot 21}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 84$$

$$u_{c2} = 12$$

$$a_2 = 1$$

$$k_{\text{inf}2} = 0,902$$

$$z_2 = 36$$

$$w_2 = \frac{z_2 \cdot u_{e2}}{2 \cdot a_2 \cdot m}$$

$$w_2 = \frac{36 \cdot 12}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 72$$

$$K = \frac{w_1 \cdot k_{\text{inf}1}}{w_2 \cdot k_{\text{inf}2}}$$

$$K = \frac{84 \cdot 0,958}{72 \cdot 0,902} = 1,239$$

$$r'_{21} = r_2 \cdot k_t \cdot K^2$$

$$r'_{21} = 0,147 \cdot 1,38 \cdot 1,239^2 = 0,311 \text{ Ом}$$

$$s_{n1} = \frac{r'_{21}}{\left[\frac{p \cdot m \cdot U_1^2}{\omega \cdot 2 \cdot M_n} - r_1 + \sqrt{\left(\frac{p \cdot m \cdot U_1^2}{\omega \cdot 2 \cdot M_n} - r \right)^2 - r_1^2 - x_k^2} \right]}$$

$$s_{n1} = \frac{0,311}{\left[\frac{2 \cdot 2 \cdot 219,393^2}{\omega \cdot 2 \cdot 92,519} - 0,259 + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 2 \cdot 219,393^2}{\omega \cdot 2 \cdot 92,519} - 0,259 \right)^2 - 0,259^2 - 0,998^2} \right]} = 0,033$$

5. Механическая характеристика для рабочего режима

$$M_f(s) = \frac{p \cdot m \cdot U_1^2 \cdot r'_1}{s \cdot \omega \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r'_1}{s} \right)^2 + (x_k)^2 \right]}$$

$$M_{f1}(s) = \frac{p \cdot m \cdot U_1^2 \cdot r'_{21}}{s \cdot \omega \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r'_{21}}{s} \right)^2 + (x_k)^2 \right]}$$

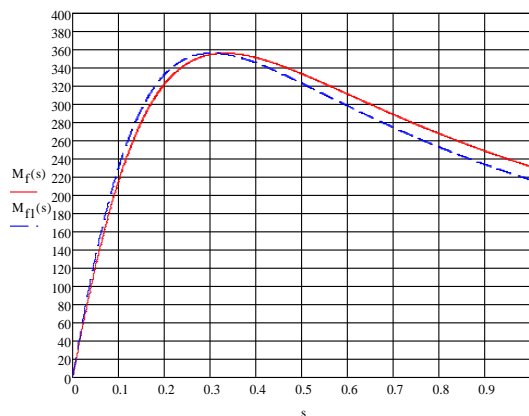


Рис. А1.1 Механическая характеристика АК160М4

$$R_s = r_1 = 0,259$$

$$R_r = r'_{21} = 0,311$$

$$L_s = \frac{x_k}{\omega} = 3,17 \cdot 10^{-3}$$

Приложение А2. Результаты исследования вращающегося трансформатора в статическом режиме

Таблица А2 – Таблица результатов моделирования в статическом режиме

Позиция	2	4	6	8	10	12	14	16
ψ	334	338	342	346	350	354	358	2
P_s	4203	4337	4450	4541	4610	4656	4680	4681
Q_s	4550	4248	3937	3620	3297	2972	2644	2366
I_s	27,49	26,95	26,39	25,81	25,2	24,56	23,9	23,22
U_{sd}	107,7	91,86	76,09	60,51	45,73	31,36	20,93	20,51
U_d	208,2	208,7	209,2	209,9	210,6	211,4	212,3	213,2
P_r	3982	4124	4243	4341	4416	4469	4500	4508
Q_r	-1880	-1583	-1277	-963,7	-644,2	-320,4	6,374	334,4
I_r	18,82	18,86	18,91	18,96	19,03	19,1	19,18	19,26
ΔP_{sr}	221	213	207	200	194	187	180	173
δ_{sd}	331,04	336,47	340,09	343,08	349,14	352,76	358,19	1,77
Позиция	18	20	22	24	26	28	30	32
ψ	6	10	14	18	22	26	30	34
P_s	4659	4614	4547	4457	4346	4213	4060	3887
Q_s	1989	1665	1346	1033	726,7	429,8	143,5	-131
I_s	22,52	21,81	21,07	20,32	19,56	18,79	18,01	17,23
U_{sd}	30,47	44,22	59,12	74,41	89,84	105,3	120,7	136
U_d	214,2	215,3	216,4	217,6	218,8	220	221,9	222,6
P_r	4493	4455	4394	4311	4207	4081	3934	3767
Q_r	662,1	987	1310	1627	1938	2240	2533	2815
I_r	19,35	19,45	19,55	19,66	19,77	19,88	19,99	20,11
ΔP_{sr}	166	159	153	146	139	132	126	120
δ_{sd}	7,09	10,64	14,19	19,51	23,06	28,38	31,92	35,47
Позиция	34	36	38	40	42	44	46	48
ψ	38	42	46	50	54	58	62	66
P_s	3695	3485	3258	3015	2757	2486	2202	1908
Q_s	-392,3	-639,1	-870,2	-1084	-1281	-1459	-1616	-1754
I_s	16,44	15,66	14,89	14,13	13,39	12,68	12	11,37
U_{sd}	151,1	166,1	181	195,6	210,1	224,3	238,03	252,1
U_d	223,9	225,2	226,5	227,8	229,1	230,4	231,7	232,9
P_r	3581	3377	3155	2917	2664	2397	2117	1827
Q_r	3085	3340	3581	3806	4013	4202	4372	4522
I_r	20,23	20,34	20,46	20,58	20,7	20,81	20,93	21,04
ΔP_{sr}	114	108	103	98	93	89	85	81
δ_{sd}	40,79	44,34	49,70	53,32	55,15	60,58	64,20	67,82
Позиция	50	52	54	56	58	60	62	64
ψ	70	74	78	82	86	90	94	98
P_s	1604	1293	974,7	652	326	-1,595	-329,3	-655,4
Q_s	-1870	-1905	-2038	-2088	-2115	-2120	-2101	-2060
I_s	10,8	10,29	9,867	9,54	9,321	9,217	9,235	9,372
U_{sd}	265,6	278,8	291,7	304,3	316,6	328,5	340,1	351,4
U_d	234,1	235,2	236,3	237,4	238,4	239,4	240,2	241,1
P_r	1526	1218	902	581,2	256,6	-70,06	-397,3	-723,4
Q_r	4652	4759	4846	4909	4950	4969	4964	4937
I_r	21,15	21,25	21,35	21,45	21,54	21,62	21,7	21,78
ΔP_{sr}	78	75	72,7	70,8	69,4	68,465	68	68
δ_{sd}	73,24	76,86	80,48	84,10	89,53	93,15	96,77	100,40

Позиция	66	68	70	72	74	76	78	80
ψ	102	106	110	114	118	122	126	130
P_s	-978,4	-1297	-1609	-1913	-2208	-2492	-2765	-3023
Q_s	-1996	-1910	-1802	-1673	-1522	-1352	-1163	-955,7
I_s	9,624	9,98	10,43	10,95	11,55	12,19	12,88	13,6
U_{sd}	362,2	372,7	382,7	392,3	401,5	410,3	418,5	426,3
U_d	241,8	242,5	243,1	243,6	244,1	244,4	244,7	244,7
P_r	-1047	-1366	-1680	-1986	-2283	-2571	-2846	-3109
Q_r	4887	4814	4719	4603	4465	4307	4129	3933
I_r	21,84	21,9	21,96	22,01	22,05	22,08	22,11	22,13
ΔP_{sr}	68,6	69	71	73	75	79	81	86
δ_{sd}	104,00	109,40	113,10	116,70	120,30	123,90	127,50	131,10
Позиция	82	84	86	88	90	92	94	96
ψ	134	138	142	146	150	154	158	162
P_s	-3268	-3496	-3707	-3901	-4075	-4230	-4364	-4477
Q_s	-731	-490,2	-234,4	35,04	316,9	609,8	912,3	1223
I_s	14,36	15,11	15,89	16,67	17,45	18,23	19,01	19,78
U_{sd}	433,6	440,4	446,7	452,4	457,6	462,3	466,3	469,8
U_d	245	245,1	245	244,9	244,7	244,3	244	243,5
P_r	-3357	-3590	-3806	-4004	-4184	-4345	-4485	-4604
Q_r	3719	3487	3241	2979	2705	2418	2121	1816
I_r	22,14	22,14	22,13	22,12	22,1	22,08	22,04	22
ΔP_{sr}	89	94	99	103	109	115	121	127
δ_{sd}	136,60	140,20	143,80	147,40	151,00	154,70	158,30	161,90
Позиция	98	100	102	104	106	108	110	112
ψ	166	170	174	178	182	186	190	194
P_s	-4568	-4637	-4683	-4707	-4708	-4686	-4641	-4573
Q_s	1540	1863	2188	2516	2844	3171	3495	3814
I_s	20,54	21,28	22,01	22,73	23,42	24,1	24,75	25,36
U_{sd}	472,8	475,1	476,8	477,9	478,4	478,3	477,6	476,3
U_d	242,9	242,3	241,6	240,9	240	239,1	238,2	237,1
P_r	-4702	-4777	-4830	-4861	-4868	-4853	-4815	-4755
Q_r	1502	1183	858,8	532,1	204,1	-123,6	-449,4	-771,7
I_r	21,95	21,89	21,85	21,78	21,72	21,63	21,52	21,43
ΔP_{sr}	134	140	147	154	160	167	174	182
δ_{sd}	165,50	169,10	172,80	176,40	180,00	183,50	188,90	192,40
Позиция	114	116	118	120	122	124	126	128
ψ	198	202	206	210	214	218	222	226
P_s	-4484	-4373	-4240	-4087	-3914	-3722	-3512	-3285
Q_s	4127	4433	4730	5016	5291	5552	5799	6030
I_s	25,96	26,56	27,11	27,63	28,13	28,59	29,03	29,43
U_{sd}	474,3	471,7	468,5	464,7	460,2	455,2	449,6	443,6
U_d	236,1	235	233,8	232,6	231,4	230,1	228,8	227,5
P_r	-4672	-4567	-4441	-4295	-4128	-3942	-3737	-3516
Q_r	-1089	-1400	-1702	-1996	-2277	-2546	-2802	-3043
I_r	21,33	21,23	21,17	21,02	20,91	20,79	20,68	20,56
ΔP_{sr}	188	194	201	208	214	220	225	231
δ_{sd}	196,00	199,50	200,40	206,60	210,10	213,70	217,20	222,60
Позиция	130	132	134	136	138	140	142	144
ψ	230	234	238	242	246	250	254	258
P_s	-3041	-2784	-2512	-2229	-1935	-1631	-1319	-1001
Q_s	6244	6441	6618	6776	6914	7030	7125	7198
I_s	29,8	30,14	30,45	30,72	30,96	31,17	31,34	31,47
U_{sd}	436,5	429,2	421,2	412,8	403,7	394,2	384,2	373,6
U_d	226,2	224,9	223,6	222,3	221	219,7	218,5	217,3
P_r	-3278	-3025	-2758	-2478	-2188	-1887	-1578	-1263
Q_r	-3267	-3475	-3664	-3834	-3984	-4113	-4221	-4307

I_r	20,44	20,32	20,2	20,09	19,97	19,86	19,75	19,64
ΔP_{sr}	237	241	246	249	253	256	259	262
δ_{sd}	226,10	229,70	233,30	237,00	242,40	246,00	249,60	253,20
Позиция	146	148	150	152	154	156	158	160
ψ	262	266	270	274	278	282	286	290
P_s	-678,7	-352,8	-25,19	302,5	628,6	951,6	1270	1582
Q_s	7248	7275	7280	7261	7220	7156	7070	6962
I_s	31,57	31,64	31,67	31,66	31,62	31,55	31,44	31,29
U_{sd}	362,6	351,2	339,3	327	314,3	301,3	287,8	274,1
U_d	216,1	215	214	213	212	211,2	210,4	209,7
P_r	-941,9	-617,4	-290,7	36,52	362,7	686,2	1005	1319
Q_r	-4371	-4412	-4430	-4426	-4398	-4348	-4276	-4181
I_r	19,53	19,43	19,34	19,25	19,16	19,09	19,02	18,95
ΔP_{sr}	263,2	264,6	265,51	265,98	265,9	265,4	265	263
δ_{sd}	256,80	260,46	265,89	269,51	273,13	276,75	280,37	287,60
Позиция	162	164	166	168	170	172	174	176
ψ	294	298	302	306	310	314	318	322
P_s	1886	2181	2466	2738	2997	3241	3469	3680
Q_s	6833	6682	6512	6323	6116	5891	5650	5394
I_s	31,11	30,9	30,65	30,36	30,05	29,7	29,32	28,91
U_{sd}	260	245,7	231,1	216,8	201,2	186	170,5	155
U_d	209,1	208,6	208,1	207,8	207,6	207,4	207,4	207,5
P_r	1625	1923	2210	2485	2748	2996	3229	3445
Q_r	-4064	-3927	-3769	-3591	-3394	-3180	-2949	-2702
I_r	18,9	18,85	18,81	18,78	18,76	18,75	18,74	18,75
ΔP_{sr}	261	258	256	253	249	245	240	235
δ_{sd}	289,42	293,04	296,66	302,09	305,71	309,33	314,76	318,38
Позиция	178	180						
ψ	326	330						
P_s	3874	4048						
Q_s	5125	4843						
I_s	28,46	27,99						
U_{sd}	139,3	123,5						
U_d	207,6	207,9						
P_r	3644	3824						
Q_r	-2441	-2166						
I_r	18,76	18,78						
ΔP_{sr}	230	224						
δ_{sd}	321,99	327,42						

Приложение А3. Результаты исследования вращающегося трансформатора в динамическом режиме

Таблица А3 – Таблица результатов моделирования в динамическом режиме

ψ	0	5	10	15	20	25	30	35
Ps	1070,95	-703,39	-2423,46	-4076,16	-5648,93	-7129,79	-8507,48	-9771,49
Qs	4288,23	4833,7	5531,52	6376,34	7361,73	8480,20	9723,23	11081,37
Is	19,22	21,24	26,26	32,91	40,36	48,19	56,19	64,26
Us	229,97	229,97	229,96	229,96	229,95	229,95	229,94	229,93
Pr	1073,52	-1104,	-3314,8	-5540,74	-7765,24	-9971,40	-12142,44	-14261,83
Qr	3976,29	4443,2	4718,75	4800,85	4688,87	4383,68	3887,58	3204,35
Ir	17,91	19,91	25,07	31,88	39,44	47,36	55,44	63,56
Ur	230,03	230,03	230,03	230,02	230,02	230,02	230,01	230,00
ψ	40	45	50	55	60	65	70	75
Ps	-10912,2	-11921	-12790,1	-13513	-14084,1	-14499,10	-14754,84	-14849,36
Qs	12544,28	14100,8	15739,1	17447	19210,78	21017,66	22853,68	24704,88
Is	72,32	80,32	88,22	96,00	103,63	111,09	118,36	125,42
Us	229,92	229,91	229,90	229,89	229,88	229,87	229,86	229,84
Pr	-16313,45	-18281,7	1073,52	-1104,4	-3314,84	-5540,74	-7765,24	-9971,40
Qr	2339,20	1298,71	3976,29	4443,2	4718,75	4800,85	4688,87	4383,68
Ir	71,66	79,70	17,91	19,91	25,07	31,88	39,44	47,36
Ur	229,99	229,98	230,03	230,03	230,03	230,02	230,02	230,02
ψ	80	85	90	95	100	105	110	115
Ps	-14781,96	-14553,15	-14164,6	-13619,4	-12921,6	-12076	-11090,8	-9971,56
Qs	26557,16	28396,43	30208,70	31980,16	33697,34	35347	36917,08	38395,14
Is	132,26	138,85	145,20	151,28	157,08	162,58	167,79	172,68
Us	229,83	229,82	229,81	229,79	229,78	229,77	229,76	229,74
Pr	-12142,44	-14261,83	-16313,4	-18281,7	-30806,5	-30887	-30774,4	-30467,72
Qr	3887,58	3204,35	2339,20	1298,71	-18648	-20871	-23093,1	-25296,76
Ir	55,44	63,56	71,66	79,70	156,70	162,22	167,44	172,35
Ur	230,01	230,00	229,99	229,98	229,84	229,83	229,81	229,80
ψ	120	125	130	135	140	145	150	155
Ps	-8727,57	-7368,23	-5903,90	-4345,72	-2705,55	-995,87	770,30	2579,5
Qs	39770,09	41031,48	42169,70	43176,08	44042,97	44763,78	45333,01	45746
Is	177,25	181,48	185,38	188,93	192,12	194,95	197,41	199,51
Us	229,73	229,72	229,71	229,71	229,70	229,69	229,69	229,68
Pr	-29969,94	-29284,83	-28417,6	-27374,88	-26164,57	-24796	-23279,3	-21626,
Qr	-27465,44	-29582,63	-31632,2	-33598,59	-35466,81	-37222,6	-38852,7	-40345
Ir	176,94	181,19	185,10	188,67	191,87	194,72	197,20	199,31
Ur	229,78	229,77	229,76	229,75	229,73	229,72	229,71	229,70
Ur	229,78	229,77	229,76	229,75	229,73	229,72	230,03	230,03
ψ	165	170	175	180	185	190	195	200
Ps	6271,85	8126,84	9968,90	11784,01	13558,35	15278,42	16931,13	18503,90
Qs	46093,88	46025,46	45795,87	45406,85	44861,36	44163,55	43318,74	42333,35
Is	202,56	203,51	204,08	204,27	204,07	203,48	202,51	201,16
Us	229,68	229,67	229,67	229,67	229,68	229,68	229,68	229,69
Pr	-17962,28	-15979,20	-13915,3	-11786,20	-9608,20	-7397,84	-5171,94	-2947,44
Qr	-42869,76	-43883,73	-44721,2	-45375,96	-45842,86	-46118,41	-46200,5	-46088,5
Ir	202,39	203,36	203,95	204,15	203,96	203,39	202,44	201,10
Ur	229,69	229,68	229,68	229,67	229,67	229,67	229,67	229,67
ψ	205	210	215	220	225	230	235	250
Ps	19985	21362,44	22626,45	22626,45	24775,96	25645,08	26367,95	27609,80
Qs	41215	39971,85	38613,71	38613,71	35594,26	33955,92	32248,27	26841,40
Is	199,43	197,32	194,85	194,85	188,79	185,23	181,32	167,59
Us	229,70	229,70	229,71	229,71	229,73	229,74	229,75	229,79
Pr	-741,28	1429,76	3549,16	3549,16	7569,00	9438,86	11196,12	15663,44
Qr	-45783	-45287,2	-44604	-44604,02	-42698,38	-41490,47	-40124,33	-35186,

Ir	199,38	197,29	194,83	194,83	188,80	185,25	181,35	167,64
Ur	229,68	229,68	229,69	229,69	229,71	229,72	229,73	229,77
ψ	255	260	265	270	275	280	285	290
Ps	27704	27636,92	27408,11	27019,61	26474,40	25776,62	24931,58	23945,72
Qs	24990	23137,92	21298,64	19486,38	17714,92	15997,74	14347,92	12778,00
Is	162,37	156,85	151,04	144,95	138,60	131,99	125,14	118,07
Us	229,80	229,81	229,83	229,84	229,85	229,86	229,88	229,89
Pr	16847	17860,80	18698,29	19352,72	19819,09	20093,86	20174,95	20061,72
Qr	-33302	-31321,6	-29260,5	-27134,3	-24959,20	-22751,63	-20528,45	-18306,57
Ir	162,43	156,92	151,12	145,03	138,68	132,07	125,22	118,15
Ur	229,78	229,80	229,81	229,83	229,85	229,86	229,88	229,90
ψ	295	300	305	310	315	320	325	330
Ps	22826,53	21582,53	20223,19	18758,86	17200,68	15560,51	13850,83	12084,66
Qs	11299,94	9924,98	8663,60	7525,38	6519,00	5652,11	4931,30	4362,07
Is	110,80	103,33	95,70	87,91	80,00	72,00	63,94	55,88
Us	229,90	229,91	229,92	229,93	229,94	229,95	229,95	229,96
Pr	19755,05	19257,26	18572,15	17704,93	16662,20	15451,90	14083,23	12566,61
Qr	-16103	-13934,2	-11817	-9767,46	-7801,07	-5932,86	-4177,03	-2546,94
Ir	110,87	103,39	95,75	87,94	80,01	71,98	63,88	55,76
Ur	229,91	229,93	229,94	229,95	229,97	229,98	229,99	230,00
ψ	335	340	345	350	355	360		
Ps	10275,43	8436,91	6583,11	4728,12	2886,06	1070,95		
Qs	3948,75	3694,48	3601,20	3669,61	3899,20	4288,23		
Is	47,87	40,05	32,63	26,03	21,10	19,22		
Us	229,96	229,97	229,97	229,97	229,97	229,97		
Pr	10913,59	9136,75	7249,61	5266,52	3202,59	1073,52		
Qr	-1055,02	287,40	1470,10	2484,06	3321,58	3976,29		
Ir	47,68	39,75	32,16	25,32	20,06	17,91		
Ur	230,01	230,01	230,02	230,02	230,03	230,03		

Приложение А4. Результаты исследования вращающегося трансформатора в динамическом режиме с последовательно включенным ИРС и компенсирующим устройством для поддержания уровня напряжения

Таблица А4 – Таблица результатов моделирования в динамическом режиме работы вращающегося трансформатора с ИРС и компенсирующим устройством

ψ	0	10	20	30	40	50	60	70
P _s	-3737,57	-3715,88	-3574,15	-3316,69	-3131,53	-2887,07	-2381,56	-1856,84
Q _s	4812,94	5505,91	6184,58	6828,33	6787,55	6440,65	6591,95	6274,88
I _s	26,50	28,89	31,07	33,01	32,51	30,70	30,49	28,48
U _s	229,97	229,97	229,96	229,96	229,96	229,96	229,96	229,96
P _к	-3,93	-3,78	-3,61	-3,43	-4,23	-5,25	-5,04	-4,29
Q _к	6538,23	6179,62	5809,16	5438,09	4639,29	3680,50	3199,73	2480,59
I _к	26,88	26,14	25,34	24,52	20,97	16,48	14,58	11,29
U _к	243,23	236,46	229,26	221,81	221,25	223,32	219,40	219,97
P _r	-4906,88	-4960,16	-4868,43	-4634,46	-4391,54	-4027,15	-3409,27	-2699,30
Q _r	2624,57	1794,00	966,80	168,10	-659,82	-1496,04	-2168,16	-2809,33
I _r	24,20	22,94	21,58	20,17	19,31	18,68	17,57	16,95
U _r	230,01	230,01	230,00	229,99	229,99	229,98	229,98	229,98
X _l	0,024	0,024	0,024	0,024	0,028	0,036	0,042	0,052
ψ	80	90	100	110	120	130	140	150
P _s	-1227,72	-516,38	-54,54	1848,31	2439,33	3117,69	3146,15	3747,28
Q _s	5905,86	5633,51	4958,28	5355,91	4744,03	4149,91	4205,60	4464,01
I _s	26,33	24,96	27,57	33,80	27,21	25,22	23,59	25,36
U _s	229,96	229,96	229,96	229,97	229,98	229,98	229,98	229,97
P _к	-1,08	5,06	38,04	-52,29	-29,68	-20,66	11,18	-0,92
Q _к	1861,46	1478,47	1108,75	835,16	763,42	713,53	1354,63	2198,76
I _к	8,49	6,93	7,65	7,08	4,85	4,03	6,42	9,88
U _к	220,61	219,97	221,23	223,71	225,22	228,74	225,94	222,67
P _r	-1848,75	-895,74	72,22	1264,91	2211,34	3111,10	3681,97	4152,21
Q _r	-3310,17	-3602,03	-3777,29	-3484,06	-3205,44	-2725,80	-2085,94	-1262,74
I _r	16,53	16,33	20,03	22,78	19,83	19,85	18,78	18,88
U _r	229,98	229,99	230,08	230,02	229,99	229,99	230,00	230,00
X _l	0,070	0,088	0,120	0,160	0,180	0,200	0,100	0,060
ψ	160	170	180	190	200	210	220	230
P _s	4107,73	4298,62	4301,88	4203,61	4025,13	3786,30	3330,22	2892,52
Q _s	4198,89	4087,83	4339,88	4381,20	4088,55	3242,23	4208,61	3733,22
I _s	25,55	25,80	26,57	26,40	24,95	21,68	23,34	20,54
U _s	229,97	229,97	229,97	229,97	229,97	229,97	229,97	229,97
P _к	-2,45	-3,24	-3,09	-2,67	-2,49	-2,87	-1,61	-1,68
Q _к	2693,72	3393,14	4411,47	5275,46	5907,19	6140,70	7526,13	7918,38
I _к	11,97	15,01	19,75	23,66	26,10	26,05	33,30	34,16
U _к	225,08	226,04	223,30	222,96	226,32	235,70	226,01	231,83
P _r	4557,66	4765,00	4737,71	4624,04	4454,95	4259,73	3670,74	3220,40
Q _r	-440,58	413,41	1239,38	2033,12	2816,49	3641,42	4104,75	4736,17
I _r	19,91	20,80	21,29	21,96	22,92	24,37	23,94	24,90
U _r	230,01	230,01	230,01	230,02	230,02	230,02	230,03	230,03
X _l	0,050	0,040	0,03	0,025	0,023	0,024	0,018	0,018
ψ	240	250	260	270	280	290	300	310
P _s	2378,65	1854,61	1279,92	684,27	153,40	-414,89	-1047,52	-1437,19
Q _s	4077,51	4687,83	4517,02	4448,55	5011,66	5150,05	4862,20	5709,29
I _s	20,53	21,92	20,42	19,57	21,81	22,47	21,63	25,60
U _s	229,97	229,97	229,97	229,97	229,97	229,96	229,97	229,96
P _к	-1,21	-0,74	-0,74	-0,75	-0,51	-0,51	-0,75	-0,49
Q _к	8703,59	9493,11	9770,20	9975,70	10354,32	10401,43	10112,18	10241,28
I _к	37,99	42,41	43,02	43,47	45,96	46,07	43,77	45,71

U_K	229,16	223,87	227,11	229,49	225,30	225,81	231,06	224,07
P_r	2605,93	1943,02	1292,69	598,83	-93,44	-793,13	-1530,36	-2111,71
Q_r	5122,21	5351,26	5658,87	5848,86	5795,86	5741,59	5674,22	5276,30
I_r	24,99	24,75	25,24	25,56	25,20	25,20	25,55	24,71
U_r	230,03	230,03	230,04	230,04	230,04	230,04	230,04	230,04
X_l	0,015	0,014	0,014	0,014	0,013	0,013	0,0130	0,0130
ψ	320	330	340	350	360			
P_s	-1860,14	-2458,29	-2734,59	-2911,70	-3737,57			
Q_s	6113,13	5632,28	6179,14	6765,65	4812,94			
I_s	27,79	26,73	29,39	32,03	26,50			
U_s	229,96	229,96	229,96	229,96	229,97			
P_K	-0,48	-1,00	-0,98	-0,96	-3,93			
Q_K	10038,89	9290,10	8964,35	8585,93	6538,23			
I_K	45,26	40,53	39,81	38,96	26,88			
U_K	221,84	229,24	225,19	220,38	243,23			
P_r	-2690,53	-3374,13	-3796,78	-4108,51	-4906,88			
Q_r	4879,42	4521,30	3919,45	3253,34	2624,57			
I_r	24,23	24,53	23,73	22,79	24,20			
U_r	230,04	230,03	230,03	230,02	230,01			
X_l	0,0130	0,0150	0,0150	0,0150	0,0240			

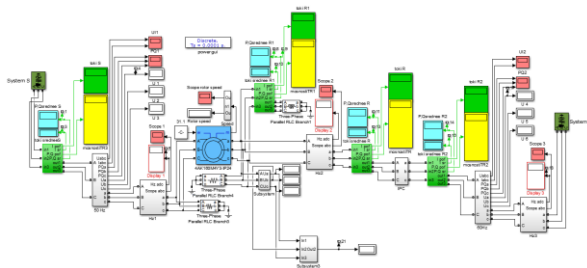


Рисунок А4.1 SPS-модель электромашиного преобразователя частоты с использованием IPC и компенсирующего устройства

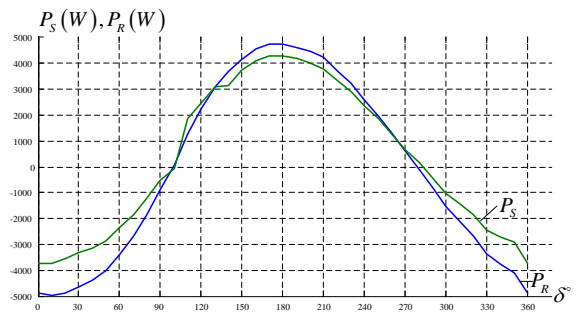


Рисунок А4.2 Зависимость активных мощностей на передающей и принимающей системах от задаваемого угла

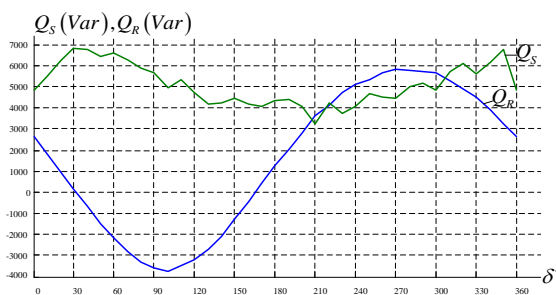


Рисунок А4.3 Зависимость реактивных мощностей на передающей и принимающей системах от задаваемого угла

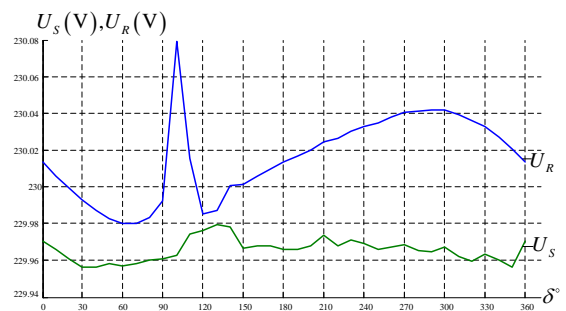


Рисунок А4.4 Зависимость напряжений на передающей и принимающей системах от задаваемого угла

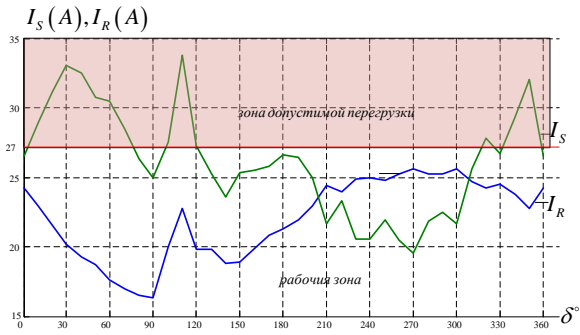


Рисунок А4.5 Зависимость тока на передающей и принимающей системах от задаваемого угла

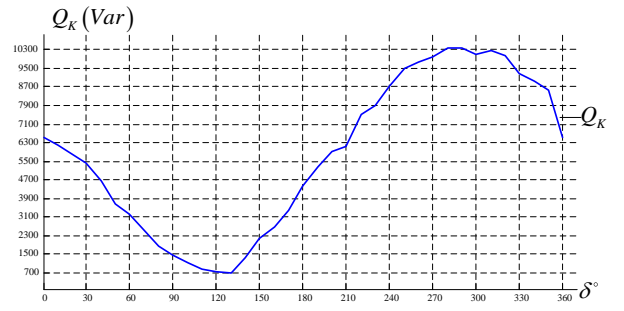


Рисунок А4.6 Зависимость реактивной мощности компенсирующего устройства от задаваемого угла

**Приложение А5. Таблицы результатов расчета динамических характеристик
двухканального вращающегося трансформатора при синхронном изменении угла ψ_0**

Таблица А5.1 – Таблица результатов моделирования в динамическом режиме работы двухканального вращающегося трансформатора при синхронном изменении угла ψ_0

ψ	0	10	20	30	40	50	60	70
Ps	-2998,70	-2970,21	-2828,96	-2579,26	-2228,68	-1787,88	-1270,25	-691,52
Qs	12397,33	13048,65	13685,10	14287,37	14837,14	15317,71	15714,48	16015,40
Is	55,48	58,21	60,79	63,16	65,27	67,09	68,58	69,74
Us	229,92	229,91	229,91	229,90	229,90	229,90	229,89	229,89
PI1	-3,75	-3,68	-3,60	-3,51	-3,42	-3,33	-3,23	-3,15
QI1	6383,56	6192,98	5996,10	5798,91	5607,40	5427,38	5264,33	5123,21
II1	29,10	28,66	28,20	27,73	27,27	26,83	26,43	26,07
Un1	219,39	216,09	212,62	209,10	205,62	202,29	199,22	196,53
PI2	-3,75	-3,68	-3,60	-3,51	-3,42	-3,33	-3,23	-3,15
QI2	6383,56	6192,98	5996,10	5798,91	5607,40	5427,38	5264,33	5123,21
II2	29,10	28,66	28,20	27,73	27,27	26,83	26,43	26,07
Un2	219,39	216,09	212,62	209,10	205,62	202,29	199,22	196,53
Pd1	-1992,54	-2019,00	-1985,24	-1892,29	-1742,97	-1541,82	-1294,95	-1009,86
Qd1	-899,97	-549,24	-198,74	140,87	459,29	746,83	994,76	1195,54
Id1	11,31	10,97	10,62	10,27	9,93	9,61	9,33	9,10
Pd2	-1992,54	-2019,00	-1985,24	-1892,29	-1742,97	-1541,82	-1294,95	-1009,86
Qd2	-899,97	-549,24	-198,74	140,87	459,29	746,83	994,76	1195,54
Id2	11,31	10,97	10,62	10,27	9,93	9,61	9,33	9,10
Pr	-4513,96	-4573,76	-4497,10	-4286,32	-3947,83	-3491,89	-2932,38	-2286,28
Qr	2165,00	1384,37	605,21	-148,80	-854,74	-1491,18	-2038,77	-2480,87
Ir	21,77	20,78	19,73	18,65	17,56	16,51	15,53	14,67
Ur	230,01	230,01	230,00	230,00	229,99	229,99	229,98	229,98
Z1	0,120	0,160	0,180	0,200	0,100	0,060	0,050	0,040
Z2	0,120	0,160	0,180	0,200	0,100	0,060	0,050	0,040
ψ	80	90	100,00	110,00	120,00	130,00	140,00	150,00
Ps	-69,28	577,57	1229,376	1866,332	2469,085	3019,320	3500,32	3897,46
Qs	16211,31	16296,27	16267,70	16126,46	15876,85	15526,45	15085,92	14568,61
Is	70,53	70,94	70,972	70,624	69,900	68,810	67,37	65,60
Us	229,89	229,89	229,886	229,887	229,888	229,890	229,89	229,90
PI1	-3,07	-3,00	-2,946	-2,904	-2,876	-2,864	-2,87	-2,89
QI1	5008,29	4923,07	4870,147	4851,119	4866,567	4916,023	4997,98	5109,96
II1	25,78	25,56	25,418	25,368	25,408	25,537	25,75	26,04
Un1	194,32	192,65	191,614	191,239	191,542	192,513	194,11	196,27
PI2	-3,07	-3,00	-2,946	-2,904	-2,876	-2,864	-2,87	-2,89
QI2	5008,29	4923,07	4870,147	4851,119	4866,567	4916,023	4997,98	5109,96
II2	25,78	25,56	25,418	25,368	25,408	25,537	25,75	26,04
Un2	194,32	192,65	191,614	191,239	191,542	192,513	194,11	196,27
Pd1	-695,21	-360,56	-16,093	327,740	660,488	972,040	1252,93	1494,62
Qd1	1343,07	1432,88	1462,228	1430,226	1337,847	1187,897	984,93	735,12
Id1	8,92	8,82	8,781	8,821	8,935	9,116	9,35	9,64
Pd2	-695,21	-360,56	-16,093	327,740	660,488	972,040	1252,93	1494,62
Qd2	1343,07	1432,88	1462,228	1430,226	1337,847	1187,897	984,93	735,12
Id2	8,92	8,82	8,781	8,821	8,935	9,116	9,35	9,64
Pr	-1573,24	-814,91	-34,344	744,750	1498,696	2204,588	2840,97	3388,52
Qr	-2804,05	-2998,49	-3058,28	-2981,61	-2770,81	-2432,28	-1976,30	-1416,74
Ir	13,98	13,51	13,300	13,365	13,699	14,275	15,05	15,97
Ur	229,98	229,98	229,979	229,980	229,983	229,986	229,99	229,99
Z1	0,070	0,088	0,120	0,160	0,180	0,200	0,100	0,060
Z2	0,070	0,088	0,120	0,160	0,180	0,200	0,100	0,060

ψ	160,00	170,00	180,00	190,00	200,00	210,00	220,00	230,00
Ps	4198,7	4479,97	4451,48	4451,48	4310,237	4060,532	3709,95	3269,154
Qs	13990,27	12722,09	12070,77	12070,77	11434,31	10832,05	10282,28	9801,707
Is	63,541	58,67	55,96	55,96	53,153	50,318	47,55	44,942
Us	229,899	229,91	229,91	229,91	229,917	229,921	229,93	229,929
PI1	-2,925	-3,04	-3,11	-3,11	-3,195	-3,283	-3,38	-3,468
QI1	5248,543	5588,03	5778,61	5778,61	5975,486	6172,677	6364,19	6544,2
II1	26,387	27,23	27,69	27,69	28,155	28,615	29,06	29,46
Un1	198,918	205,25	208,72	208,72	212,251	215,72	219,05	222,12
PI2	-2,925	-3,04	-3,11	-3,11	-3,19	-3,28	-3,38	-3,46
QI2	5248,543	5588,03	5778,61	5778,61	5975,48	6172,67	6364,19	6544,2
II2	26,387	27,23	27,69	27,69	28,15	28,61	29,06	29,46
Un2	198,918	205,25	208,72	208,72	212,25	215,72	219,05	222,12
Pd1	1689,773	1918,33	1944,79	1944,79	1911,034	1818,083	1668,76	1467,611
Qd1	-564,53	-564,53	-915,02	-1254,6	-1573,06	-1860,5	-564,53	-564,53
Id1	11,00	11,00	11,34	11,65	11,95	12,20	11,00	11,00
Pd2	1944,79	1944,79	1911,03	1818,08	1668,76	1467,61	1944,79	1944,79
Qd2	-564,53	-564,53	-915,02	-1254,64	-1573,06	-1860,59	-564,53	-564,53
Id2	11,00	11,00	11,340	11,65	11,95	12,20	11,00	11,00
Pr	4407,98	4407,98	4331,32	4120,54	3782,05	3326,11	4407,98	4407,98
Qr	1481,55	1481,55	2260,705	3014,71	3720,66	4357,09	1481,55	1481,55
Ir	20,22	20,22	21,24	22,19	23,07	23,83	20,22	20,22
Ur	230,02	230,02	230,02	230,02	230,03	230,03	230,02	230,02
Z1	0,030	0,025	1462,23	1430,23	0,023	0,024	0,018	0,023
Z2	0,030	0,025	8,78	8,82	0,023	0,024	0,018	0,023
ψ	240	250	260	270	280	290	300	310
Ps	2751,526	2172,799	1550,556	903,705	251,898	-385,058	-987,81	-1538,04
Qs	9404,936	9104,021	8908,106	8823,142	8851,713	8992,949	9242,55	9592,95
Is	42,622	40,710	39,328	38,577	38,516	39,15	40,42	42,25
Us	229,932	229,935	229,937	229,938	229,93	229,93	229,93	229,93
PI1	-3,55	-3,644	-3,72	-3,79	-3,84	-3,88	-3,916	-3,92
QI1	6707,2	6848,3	6963,29	7048,51	7101,4	7120,46	7105,01	7055,56
II1	29,82	30,14	30,392	30,57	30,69	30,73	30,69	30,59
Un1	224,87	227,23	229,13	230,52	231,39	231,70	231,45	230,64
PI2	-3,55	-3,64	-3,72	-3,790	-3,84	-3,88	-3,91	-3,92
QI2	6707,25	6848,37	6963,29	7048,51	7101,44	7120,46	7105,01	7055,56
II2	29,828	30,14	30,39	30,57	30,69	30,73	30,69	30,591
Un2	224,87	227,231	229,131	230,52	231,39	231,705	231,454	230,647
Pd1	1220,73	935,64	621,00	286,35	-58,11	-401,94	-734,6	-1046,24
Qd1	-2108,52	-2309,30	-2456,84	-2546,64	-2575,99	-2543,99	-2451,61	-2301,66
Id1	12,42	12,59	12,720	12,79	12,81	12,79	12,71	12,583
Pd2	1220,7	935,6	621,0	286,3	-58,11	-401,94	-734,69	-1046,24
Qd2	-2108,52	-2309,30	-2456,84	-2546,6	-2575,99	-2543,99	-2451,61	-2301,66
Id2	12,42	12,59	12,720	12,79	12,819	12,791	12,712	12,58
Pr	2766,59	2120,5	1407,4	649,13	-131,43	-910,52	-1664,47	-2370,36
Qr	4904,68	5346,78	5669,96	5864,40	5924,2	5847,53	5636,73	5298,1
Ir	24,48	25,00	25,39	25,65	25,76	25,72	25,5	25,2
Ur	230,0	230,	230,04	230,041	230,040	230,039	230,037	230,034
Z1	0,015	0,014	0,014	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013
Z2	0,015	0,014	0,014	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013
ψ	320	330	340	350	360			
Ps	-2019,04	-2416,19	-2717,42	-2913,57	-2998,70			
Qs	10033,50	10550,80	11129,14	11750,95	12397,33			
Is	44,52	47,08	49,83	52,66	55,48			
Us	229,93	229,93	229,93	229,92	229,92			
PI1	-3,92	-3,90	-3,87	-3,82	-3,75			
QI1	6973,60	6861,63	6723,04	6562,06	6383,56			
II1	30,41	30,17	29,86	29,50	29,10			

Un1	229,30	227,46	225,15	222,43	219,39
PI2	-3,92	-3,90	-3,87	-3,82	-3,75
QI2	6973,60	6861,63	6723,04	6562,06	6383,56
II2	30,41	30,17	29,86	29,50	29,10
Un2	229,30	227,46	225,15	222,43	219,39
Pd1	-1327,14	-1568,83	-1763,98	-1906,66	-1992,54
Qd1	-2098,70	-1848,89	-1559,82	-1240,28	-899,97
Id1	12,41	12,19	11,93	11,63	11,31
Pd2	-1327,14	-1568,83	-1763,98	-1906,66	-1992,54
Qd2	-2098,70	-1848,89	-1559,82	-1240,28	-899,97
Id2	12,41	12,19	11,93	11,63	11,31
Pr	-3006,75	-3554,30	-3996,37	-4319,53	-4513,96
Qr	4842,22	4282,65	3636,50	2923,40	2165,00
Ir	24,78	24,20	23,49	22,68	21,77
Ur	230,03	230,03	230,02	230,02	230,01
Z1	0,070	0,088	0,120	0,160	0,180
Z2	0,070	0,088	0,120	0,160	0,180

Таблица А5.2 – Таблица результатов моделирования в динамическом режиме работы двухканального вращающегося трансформатора при синхронном изменении угла ψ_0

ψ	0	10	20	30	40	50	60	70
Ps	-7474,60	-7353,91	-6995,50	-6410,27	-5930,25	-5291,34	-4223,12	-2974,31
Qs	9621,01	9627,89	9648,30	9681,60	8305,46	6329,71	5334,41	4137,02
Is	52,99	52,69	51,83	50,50	44,39	35,89	29,61	22,21
Us	229,94	229,94	229,94	229,94	229,95	229,96	229,97	229,97
PS1	-3737,29	-3715,97	-3574,57	-3317,36	-3132,47	-2888,22	-2414,30	-1857,77
Qs1	4810,51	5503,69	6182,68	6826,83	6786,82	6440,77	6451,30	6276,15
Is1	26,50	28,88	31,06	33,01	32,51	30,70	29,96	28,49
Un1	243,21	236,45	229,25	221,81	221,25	223,33	220,92	219,99
Ps2	-3737,31	-3637,94	-3420,93	-3092,91	-2797,78	-2403,13	-1808,82	-1116,53
Qs2	4810,51	4124,20	3465,62	2854,76	1518,64	-111,06	-1116,90	-2139,13
Is2	26,50	23,92	21,18	18,31	13,85	10,47	9,27	10,54
Un2	243,21	249,37	254,80	259,38	271,51	286,53	294,83	303,37
Pr1	-4331,70	-4379,25	-4298,77	-4092,68	-3879,59	-3559,85	-3031,46	-2388,83
Qr1	-2382,68	-1608,02	-834,34	-85,14	638,41	1350,69	1977,90	2519,20
Ir1	23,10	22,38	21,63	20,89	20,11	19,31	18,60	17,95
Pr2	-4331,70	-4157,60	-3862,27	-3454,72	-3070,93	-2621,42	-1989,70	-1288,41
Qr2	-2382,68	-3134,76	-3841,43	-4481,23	-5214,08	-5969,86	-6507,72	-6964,44
Ir2	23,10	23,78	24,40	24,96	25,55	26,13	26,54	26,88
Pk1	-3,90	-3,75	-3,59	-3,41	-4,21	-5,23	-5,12	-4,26
Qk1	6537,35	6179,04	5808,78	5437,84	4639,34	3680,78	3090,80	2480,91
Ik1	26,88	26,13	25,34	24,52	20,97	16,48	13,99	11,29
Pk2	-3,90	-4,02	-4,11	-4,18	-5,76	-8,71	-10,68	-13,66
Qk2	6537,35	6872,84	7175,31	7435,59	6985,07	6054,57	5497,49	4705,32
Ik2	26,88	27,56	28,16	28,67	25,73	21,13	18,65	15,51
Pr	-9812,75	-9669,37	-9243,59	-8548,35	-7870,87	-6997,78	-5683,11	-4160,97
Qr	5252,21	5230,19	5164,80	5058,07	4951,80	4828,01	4657,52	4477,43
Ir	48,39	47,80	46,04	43,19	40,43	36,97	31,95	26,59
Ur	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03
Qr	5252,21	5230,19	5164,80	5058,07	4951,80	4828,01	4657,52	4477,43
Ir	48,39	47,80	46,04	43,19	40,43	36,97	31,95	26,59
Ur	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03
Z1	0,024	0,024	0,024	0,024	0,028	0,036	0,042	0,052
Z2	0,024	0,024	0,024	0,024	0,028	0,036	0,042	0,052
ψ	80	90	100	110	120	130	140	150
Ps	-1549,53	24,44	1523,73	3763,76	5276,91	6695,74	7052,08	7918,76

Qs	2786,49	2041,05	1355,00	401,22	370,37	336,36	2509,50	4390,85
Is	14,00	9,03	9,93	24,02	28,03	33,31	33,53	39,39
Us	229,98	229,99	230,01	230,08	230,05	230,05	230,03	229,97
PS1	-1228,31	-516,50	-55,35	1845,49	2439,02	3118,16	3147,49	3748,44
Qs1	5907,53	5635,29	4958,51	5354,03	4744,01	4149,92	4205,65	4463,38
Is1	26,33	24,96	27,60	33,69	27,17	25,20	23,60	25,36
Un1	220,63	220,00	221,40	223,94	225,30	228,80	225,98	222,67
Ps2	-321,22	540,94	1579,09	1918,28	2837,89	3577,58	3904,59	4170,32
Qs2	-3121,04	-3594,24	-3603,51	-4952,81	-4373,64	-3813,56	-1696,15	-72,53
Is2	13,77	16,20	23,59	33,39	27,34	25,82	19,27	18,15
Un2	311,80	315,45	318,54	317,82	313,31	307,59	290,70	271,16
Pr1	-1633,89	-779,86	176,80	916,46	1832,73	2661,64	3267,10	3663,90
Qr1	2950,65	3203,06	3265,21	3301,23	2997,47	2543,63	1813,60	1159,50
Ir1	17,40	17,10	19,66	24,82	21,36	20,81	18,71	19,50
Pr2	-529,18	289,47	1003,68	2266,84	2950,92	3609,48	3921,02	4234,84
Qr2	-7318,50	-7429,02	-7387,32	-7138,97	-6646,26	-6013,05	-5080,85	-3972,62
Ir2	27,09	27,11	28,31	33,51	30,00	28,65	25,17	24,42
Pk1	-1,05	5,10	38,25	-52,01	-29,56	-20,59	11,19	-0,92
Qk1	1861,76	1478,74	1109,16	835,21	763,46	713,57	1354,76	2198,76
Ik1	8,49	6,94	7,68	7,14	4,86	4,02	6,42	9,88
Pk2	-19,03	-25,77	-65,43	49,94	21,46	11,10	-17,65	-7,60
Qk2	3696,29	3008,23	2217,58	1739,39	1494,68	1295,53	2229,80	3256,01
Ik2	11,88	9,64	8,93	8,50	6,10	5,06	7,95	12,01
Pr	-2448,26	-557,56	1317,85	3619,05	5416,59	7093,92	8146,03	8951,23
Qr	4293,65	4089,60	3793,44	4012,11	3759,08	3580,29	3156,07	2935,97
Ir	21,58	18,48	27,79	39,90	35,66	38,71	38,62	40,96
Ur	230,03	230,03	230,09	230,13	230,06	230,05	230,04	230,03
Qr	4293,65	4089,60	3793,44	4012,11	3759,08	3580,29	3156,07	2935,97
Ir	21,58	18,48	27,79	39,90	35,66	38,71	38,62	40,96
Ur	230,03	230,03	230,09	230,13	230,06	230,05	230,04	230,03
Z1	0,07	0,088	0,12	0,16	0,18	0,200	0,100	0,060
Z2	0,07	0,088	0,12	0,16	0,18	0,200	0,100	0,060
ψ	160	170	180	190	200	210	220	230
Ps	8478,72	8714,16	8603,02	8325,59	7903,83	7349,07	6461,56	5548,42
Qs	5344,84	6664,56	8675,24	10148,46	10863,10	10451,29	13172,63	13135,48
Is	43,59	47,71	53,14	57,10	58,44	55,57	63,82	62,03
Us	229,96	229,95	229,93	229,92	229,92	229,92	229,90	229,90
PS1	4108,48	4298,85	4301,52	4202,78	4023,97	3784,97	3328,74	2891,13
Qs1	4197,70	4086,14	4337,62	4378,52	4085,71	3239,68	4205,24	3730,08
Is1	25,55	25,80	26,57	26,40	24,94	21,67	23,33	20,53
Un1	225,07	226,03	223,28	222,93	226,28	235,66	225,96	231,77
Ps2	4370,24	4415,31	4301,50	4122,81	3879,86	3564,10	3132,82	2657,30
Qs2	1147,13	2578,42	4337,62	5769,95	6777,40	7211,61	8967,39	9405,40
Is2	19,65	22,24	26,57	30,85	33,97	34,99	41,32	42,52
Un2	257,68	242,14	223,28	208,10	197,64	193,52	175,69	172,21
Pr1	4021,45	4204,46	4180,23	4079,62	3930,12	3757,73	3237,71	2840,33
Qr1	427,88	-322,64	-1022,30	-1710,12	-2415,34	-3202,70	-3531,43	-4123,23
Ir1	20,31	21,12	21,85	22,53	23,19	23,90	24,23	24,74
Pr2	4421,49	4413,16	4180,23	3860,27	3494,94	3123,62	2406,27	1849,09
Qr2	-3006,75	-2011,37	-1022,30	-168,43	560,81	1193,68	1699,44	2110,66
Ir2	23,61	22,75	21,85	21,03	20,29	19,61	19,09	18,62
Pk1	-2,46	-3,24	-3,09	-2,69	-2,51	-2,88	-1,63	-1,70
Qk1	2693,58	3392,74	4410,52	5273,92	5905,13	6138,40	7522,52	7914,35
Ik1	11,97	15,01	19,75	23,66	26,10	26,05	33,30	34,15
Pk2	-5,63	-4,26	-3,09	-2,37	-2,01	-2,06	-1,22	-1,21
Qk2	3528,24	3892,69	4410,52	4595,85	4505,57	4140,14	4548,00	4369,52
Ik2	13,69	16,07	19,75	22,09	22,80	21,39	25,89	25,38
Pr	9568,02	9766,15	9474,86	8998,29	8414,92	7798,96	6396,53	5314,92

Qr	2779,55	2631,84	2481,76	2414,71	2437,91	2564,35	2568,51	2748,79
Ir	43,32	43,98	42,58	40,51	38,09	35,69	29,97	26,02
Ur	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03	230,02	230,02
Qr	2779,55	2631,84	2481,76	2414,71	2437,91	2564,35	2568,51	2748,79
Ir	43,32	43,98	42,58	40,51	38,09	35,69	29,97	26,02
Ur	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03	230,02	230,02
Z1	0,050	0,040	0,030	0,025	0,023	0,024	0,018	0,018
Z2	0,050	0,040	0,030	0,025	0,023	0,024	0,018	0,018
ψ	240	250	260	270	280	290	300	310
Ps	4573,62	3531,60	2373,98	1180,07	155,04	-974,38	-2034,11	-2991,93
Qs	15071,25	15828,26	15797,08	15764,74	16620,37	16594,43	16569,93	16547,67
Is	68,52	70,55	69,49	68,77	72,31	72,32	72,63	73,15
Us	229,89	229,89	229,89	229,89	229,89	229,89	229,89	229,89
PS1	2381,52	1853,60	1279,26	684,00	153,44	-414,51	-949,87	-1436,37
Qs1	4492,64	4683,71	4513,00	4444,59	5007,19	5145,51	5380,33	5704,52
Is1	22,12	21,91	20,41	19,56	21,79	22,46	23,77	25,59
Un1	224,64	223,80	227,05	229,42	225,23	225,75	225,34	224,01
Ps2	2192,09	1678,00	1094,72	496,07	1,60	-559,87	-1084,24	-1555,56
Qs2	10578,61	11144,55	11284,08	11320,15	11613,18	11448,91	11189,61	10843,15
Is2	47,00	49,03	49,32	49,29	50,52	49,87	48,91	47,65
Un2	161,26	157,13	157,91	160,03	159,38	163,69	168,83	174,59
Pr1	2266,64	1713,55	1140,00	528,08	-82,39	-699,46	-1298,91	-1862,52
Qr1	-4326,74	-4596,54	-4887,57	-5070,39	-4992,84	-4949,74	-4795,08	-4533,53
Ir1	24,94	25,18	25,42	25,57	25,52	25,48	25,35	25,13
Pr2	1139,34	489,38	-143,49	-775,79	-1365,94	-1924,72	-2428,54	-2862,08
Qr2	2322,49	2447,18	2494,27	2425,27	2191,99	1905,89	5814,39	6217,28
Ir2	18,41	18,27	18,21	18,29	18,57	18,89	34,44	35,62
Pk1	-0,98	-0,75	-0,75	-0,74	-0,50	-0,48	-4223,51	-5353,49
Qk1	8921,39	9487,36	9764,22	9969,62	10347,95	10395,23	4276,85	4488,25
Ik1	39,72	42,40	43,01	43,46	45,95	46,05	26,13	30,37
Pk2	-0,71	-0,55	-0,56	-0,56	-0,40	-0,41	230,03	230,03
Qk2	4597,55	4676,81	4722,83	4850,57	5181,54	5465,60	4276,85	4488,25
Ik2	28,51	29,77	29,91	30,31	32,51	33,39	26,13	30,37
Pr	3860,28	2496,90	1129,81	-280,11	-1640,82	-2973,30	230,03	230,03
Qr	2870,25	3069,56	3318,02	3574,50	3794,21	4043,12	0,013	0,013
Ir	20,92	17,20	15,24	15,59	17,97	21,82	0,013	0,013
Ur	230,02	230,02	230,02	230,02	230,02	230,03	5814,39	6217,28
Qr	2870,25	3069,56	3318,02	3574,50	3794,21	4043,12	34,44	35,62
Ir	20,92	17,20	15,24	15,59	17,97	21,82	-4223,51	-5353,49
Ur	230,02	230,02	230,02	230,02	230,02	230,03	4276,85	4488,25
Z1	0,015	0,014	0,014	0,014	0,013	0,013	26,13	30,37
Z2	0,015	0,014	0,014	0,014	0,013	0,013	230,03	230,03
ψ	320	330	340	350	360			
Ps	-3818,75	-5026,25	-5543,97	-5861,04	-7474,60			
Qs	16528,35	14770,11	14753,53	14743,35	9621,01			
Is	73,80	67,87	68,56	69,02	52,99			
Us	229,89	229,90	229,90	229,90	229,94			
PS1	-1859,25	-2457,31	-2733,76	-2911,09	-3737,29			
Qs1	6108,25	5628,11	6174,94	6761,49	4810,51			
Is1	27,78	26,71	29,38	32,02	26,50			
Un1	221,79	229,19	225,14	220,35	243,21			
Ps2	-1959,50	-2568,93	-2810,21	-2949,94	-3737,31			
Qs2	10420,10	9142,00	8578,59	7981,86	4810,51			
Is2	46,12	41,31	39,27	37,02	26,50			
Un2	180,72	195,99	202,57	208,92	243,21			
Pr1	-2373,18	-2976,63	-3349,74	-3625,06	-4331,70			
Qr1	-4173,03	-3918,12	-3365,62	-2752,33	-2382,68			
Ir1	24,82	24,56	24,08	23,53	23,10			

Pr2	-3212,17	-3629,85	-3796,66	-3852,00	-4331,70
Qk2	6662,02	6790,35	7253,76	7716,33	6537,35
Ik2	36,87	34,65	35,81	36,94	26,88
Pr	-6328,89	-7485,45	-8097,27	-8471,96	-9812,75
Qr	4670,86	4889,91	4999,24	5066,21	5252,21
Ir	34,20	38,87	41,37	42,92	48,39
Ur	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03
Qr	4670,86	4889,91	4999,24	5066,21	5252,21
Ir	34,20	38,87	41,37	42,92	48,39
Ur	230,03	230,03	230,03	230,03	230,03
Z1	0,013	0,015	0,015	0,015	0,024
Z2	0,013	0,015	0,015	0,015	0,024

Приложение А6. Результаты расчета и имитационного моделирования статических характеристик преобразователя частоты на основе источников неизменного тока (IPC)

Таблица А6.1 – Таблица результатов расчета в статическом режиме

Ключи	I, II-1		VII, VIII-2			I, II-1		VII, VIII-2		
	III, IV-2	V, VI-1	IX, X-2	XI, XII-1		III,IV-2	V,VI-1	IX, X-1	XI, XII-1	
δ	-0,5	7	14,5	22	29,5	29,5	37	44,5	52	59,5
<i>PS</i>	2553	2621	2645	2625	2562	2555	2622	2647	2628	2565
<i>QS</i>	-655,3	-327	7,4	342,1	671,4	-660,6	-332,3	1,9	336,6	665,9
<i>IS</i>	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
<i>PR</i>	2392	2461	2486	2467	2404	2393	2462	2486	2467	2405
<i>QR</i>	657,2	328,6	-6,2	-341,3	-671	653,7	325,3	-9,2	-344,1	-673,6
<i>IR</i>	10,8	10,8	10,8	10,8	10,9	10,8	10,8	10,8	10,8	10,9
<i>PI</i>	334,7	332,3	324,3	310,8	292	300,1	276,3	247,9	215,6	179,7
<i>QI</i>	18,02	-25,4	-68,1	-109,4	-148,6	-152,9	-189,3	-222,3	-251,3	-275,9
<i>II</i>	2,89	2,87	2,87	2,85	2,85	2,9	2,88	2,87	2,86	2,85
<i>PII</i>	-339,9	-337,4	-329,3	-315,7	-296,8	-303,1	-279,3	-251	-218,6	-182,7
<i>QII</i>	18,4	-24,9	-67,6	-108,8	-147,9	-152,3	-188,5	-221,4	-250,3	-274,7
<i>III</i>	3	3	3	2,98	2,97	2,98	2,97	2,96	2,95	2,94
<i>PIII</i>	281,7	301,2	315,6	324,4	327,7	336,2	333,8	325,7	312,1	293
<i>QIII</i>	184,4	145,6	104,6	62,1	18,8	-118,6	-24,7	-67,4	-108,7	-147,8
<i>IIII</i>	2,86	2,85	2,84	2,83	2,82	2,85	2,85	2,84	2,83	2,83
<i>PIV</i>	-284	-303,6	-317,8	-326,7	-329,8	-337,1	-334,6	-326,5	-312,9	-294
<i>QIV</i>	184,2	145,4	104,3	61,8	18,5	18,4	-25	-67,7	-108,9	-148
<i>IIIV</i>	2,96	2,96	2,95	2,94	2,93	2,97	2,96	2,95	2,94	2,93
<i>UCI</i>	203,5	195,4	186,4	176,7	166,2	168,4	157,4	145,6	133,2	120
<i>ICI</i>	2,98	2,87	2,74	2,6	2,45	2,49	2,33	2,17	1,99	1,81
<i>ULI</i>	197,4	204,3	210,2	215,3	219,4	222,5	225,6	227,8	229	229,2
<i>ILI</i>	2,86	2,96	3,05	3,1	3,18	3,23	3,27	3,3	3,32	3,32
<i>UCII</i>	121,6	108,3	94,6	80,5	66	66,5	52	37,3	22,5	8,5
<i>ICII</i>	1,8	1,61	1,41	1,22	1	0,99	0,79	0,59	0,41	0,27
<i>ULII</i>	110,8	123,2	135,2	146,6	157,4	159,5	169,5	178,7	187,2	191,9
<i>ILII</i>	1,61	1,79	1,96	2,1	2,28	2,31	2,46	2,59	2,7	2,83
<i>UCIII</i>	203,5	195,4	186,4	176,7	166,2	168,4	157,4	145,6	133,2	120,3
<i>ICIII</i>	2,6	2,46	2,35	2,2	2,1	2,1	1,99	1,84	1,69	1,53
<i>ULIII</i>	110,8	123,3	135,2	146,6	157,4	159,5	169,5	178,7	187,2	194,9
<i>ILIII</i>	2,6	2,46	2,35	2,23	2,1	2,1	1,99	1,84	1,69	1,53
<i>UCIV</i>	203,3	195,1	186,1	176,3	165,8	167,4	156,2	144,4	132	119
<i>ICIV</i>	2,6	2,5	2,35	2,23	2,1	2,1	1,98	1,839	1,68	1,52
<i>ULIV</i>	110,8	123,2	135,2	146,6	157,3	159,5	169,5	178,7	187,2	194,9
<i>ILIV</i>	1,4	1,55	1,7	1,84	1,98	2	2,1	2,2	2,35	2,45
<i>U'SI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
<i>I'SI</i>	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6
<i>U''SI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
<i>I''SI</i>	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,6	5,6	5,6	5,6
<i>U'S2</i>	113,8	113,3	112,9	112,4	112	113,7	113,3	112,9	112,5	112,2
<i>I'S2</i>	14	13,9	13,9	13,8	13,8	11,9	11,9	11,8	11,8	11,8
<i>U''S2</i>	114,1	113,8	113,6	113,3	113,1	114,3	113,9	113,6	113,2	112,9
<i>I''S2</i>	9	9	8,9	8,9	8,9	11,1	11,1	11,09	11,06	11
<i>U'RI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
<i>I'RI</i>	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,5	6,5
<i>U''RI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230

<i>I'RI</i>	4,8	4,8	4,9	4,9	4,9	5,1	5,2	5,19	5,22	5,2
<i>U'R2</i>	117,3	116,9	116,4	115,9	115,4	117	116,6	116,1	115,6	115,1
<i>I'R2</i>	12,9	12,8	12,8	12,8	12,8	12,9	12,9	12,8	12,8	12,9
<i>U''R2</i>	117,6	117,5	117,3	117,1	116,8	117,9	117,8	117,6	117,4	117,2
<i>I''R2</i>	9,9	10	10	10	10	10,6	10,7	10,7	10,7	10,7
<i>U1,3,5</i>	114,4	114	113,6	113,2	112,8	114	113,6	113,2	112,8	112,5
<i>U2,4,6</i>	113,6	113,2	112,9	112,6	112,3	114	113,6	113,3	113	112,7
<i>U7,9,11</i>	116,9	116,6	116,3	116	115,7	116,8	116,5	116,3	116	115,7
<i>U8,10,12</i>	118	117,7	117,4	117	116,6	118,1	117,8	117,4	117	116,6
Ключи	I, II-1				VII, VIII-2		I, II-2			
	III, IV-2				IX, X-1		III, IV-2			
	V, VI-1				XI, XII-2		V, VI-1			
<i>δ</i>	59,5	67	74,5	82	89,5	89,5	97	104,5	112	119,5
<i>PS</i>	2555	2623	2647	2628	2566	2554	2623	2648	2629	2566
<i>QS</i>	-661,9	-333,7	0,7	335,4	664,7	-662,2	-333,8	0,7	335,6	665,1
<i>IS</i>	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,52	11,53
<i>PR</i>	2392	2460	2485	2466	2404	2390	2459	2484	2465	2403
<i>QR</i>	654,2	326	-8,3	-343,1	-672,5	657	328,9	-5,36	-340	-669,4
<i>IR</i>	10,8	10,8	10,8	10,8	10,85	10,78	10,79	10,8	10,82	10,85
<i>PI</i>	183,8	145	104	61,46	18,1	-17,2	26,3	69,1	110,4	149,7
<i>QI</i>	-282,5	-302,1	-316,5	-325,5	-328,8	336,7	334,2	326,1	312,5	293,6
<i>II</i>	2,88	2,87	2,86	2,85	2,85	2,89	2,89	2,88	2,88	2,87
<i>PII</i>	-186,9	-148,1	-107	-64,7	-21,4	18,3	-25,1	-67,8	-109,1	-148,3
<i>QII</i>	-281,4	-300,9	-315	-324	-327	338,4	335,9	327,8	314,3	295,4
<i>III</i>	2,98	2,97	2,96	2,95	2,94	2,96	2,96	2,95	2,95	2,94
<i>PIII</i>	300,2	276,4	248,1	215,7	179,8	183,9	145,1	104,1	61,6	18,3
<i>QIII</i>	-151,4	-187,8	-220,7	-249,6	-274,1	-281,5	-301,1	-315,4	-324	-327,6
<i>IIII</i>	2,87	2,86	2,85	2,84	2,8	2,87	2,86	2,85	2,84	2,83
<i>PIV</i>	-300,9	-277	-248,6	-216,2	-180,3	-183,7	-144,9	-103,9	-61,4	-18,1
<i>QIV</i>	-151,7	-188	-220,9	-249,8	-274,3	-280,5	-300	-314,3	-323,2	-326,4
<i>IV</i>	2,96	2,96	2,95	2,94	2,93	2,96	2,96	2,95	2,94	2,93
<i>UCI</i>	121,8	108,6	94,8	80,7	66,2	222,2	225,4	227,6	228,9	229,2
<i>ICI</i>	1,83	1,64	1,45	1,25	1,04	3,23	3,28	3,32	3,34	3,35
<i>ULI</i>	232	231,3	229,5	226,8	223	54,76	69,044	83	96,7	109,9
<i>ILI</i>	3,36	3,35	3,33	3,29	3,23	0,79	1	1,2	1,4	1,59
<i>UCII</i>	11,9	12,05	24,4	38,6	52,9	226	221,4	215,8	209,3	201,9
<i>ICII</i>	0,4	0,43	0,54	0,7	0,88	3,28	3,22	3,14	3,06	2,96
<i>ULII</i>	197,3	204,1	209,9	214,9	219	66,7	52,1	37,3	22,45	7,9
<i>ILII</i>	2,86	2,96	3,04	3,12	3,18	0,97	0,76	0,54	0,33	0,11
<i>UCIII</i>	121,8	108,6	94,8	80,7	66,2	66,7	52,1	37,3	22,45	7,9
<i>ICIII</i>	1,55	1,39	1,22	1,04	0,87	0,9	0,73	0,56	0,41	0,29
<i>ULIII</i>	197,3	204,1	209,9	214,9	219	221,5	224,6	226,8	227,9	228,1
<i>ILIII</i>	1,55	1,39	1,22	1,04	0,87	0,9	0,73	0,56	0,41	0,29
<i>UCIV</i>	120,6	107,2	93,5	79,3	64,8	65	50,4	35,5	20,7	6,8
<i>ICIV</i>	1,53	1,36	1,19	1,01	0,83	0,88	0,72	0,57	0,45	0,37
<i>ULIV</i>	197,3	204,1	209,9	214,9	219	221,5	224,6	226,8	227,9	228,1
<i>ILIV</i>	2,48	2,56	2,64	2,7	2,75	2,78	2,82	2,85	2,86	2,86
<i>U'S1</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
<i>I'S1</i>	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7	4,35	4,4	4,37	4,39	4,4
<i>U''S1</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
<i>I''S1</i>	5,9	6	6	6	6	7,18	7,2	7,2	7,2	7,2
<i>U'S2</i>	113,6	113,2	112,9	112,6	112,3	113,9	113,6	113,4	113,1	112,9
<i>I'S2</i>	11,2	11,2	11,1	11,1	11,1	8,6	8,6	8,6	8,6	8,56
<i>U''S2</i>	114,3	113,9	113,6	113,2	112,9	114	113,5	113,1	112,6	112,3
<i>I''S2</i>	11,9	11,9	11,9	11,9	11,8	14,4	14,38	14,35	14,3	14,25
<i>U'RI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230

<i>I'RI</i>	5,35	5,37	5,4	5,4	5,48	4,92	4,94	4,97	5	5,06		
<i>U''RI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230		
<i>I''RI</i>	6,36	6,38	6,4	6,4	6,4	6,6	6,7	6,68	6,7	6,7		
<i>U'R2</i>	116,4	116	115,6	115,1	114,7	116,3	115,9	115,5	115,1	114,7		
<i>I'R2</i>	10,8	10,75	10,75	10,76	10,8	9,9	9,9	9,89	9,9	9,9		
<i>U''R2</i>	118,5	118,3	118,1	117,9	117,5	118,6	118,4	118,2	117,9	117,5		
<i>I''R2</i>	13,1	13,1	13,1	13,08	13,07	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6		
<i>U1,3,5</i>	113,9	113,5	113,1	112,7	112,4	113,5	113,1	112,7	112,4	112,1		
<i>U2,4,6</i>	114,2	113,8	113,5	113,2	112,9	114,5	114,1	113,7	113,4	113,1		
<i>U7,9,11</i>	117	116,8	116,6	116,3	116,1	117,1	116,9	116,7	116,4	116,1		
<i>U8,10,12</i>	118	117,6	117,2	116,8	116,8	117,8	117,4	117	116,6	116,1		
Ключи	I, II-2				VII, VIII-2		I, II-2				VII, VIII-2	
	III, IV-1				IX, X-1		III, IV-1				IX, X-1	
	V, VI-1				XI, XII-2		V, VI-2				XI, XII-2	
<i>δ</i>	119,5	127	134,5	142	149,5	149,5	157	164,5	172	179,5		
<i>PS</i>	2556	2624	2649	2630	2568	2554	2623	2648	2629	2566		
<i>QS</i>	-662,7	-334,1	0,63	335,7	665,5	-657,9	-329,1	5,8	341	671		
<i>IS</i>	11,48	11,5	11,52	11,53	11,54	11,47	11,49	11,51	11,53	11,53		
<i>PR</i>	2390	2459	2484	2466	2404	2387	2456	2482	2463	2401		
<i>QR</i>	658,4	330,3	-3,9	-338,7	-668,2	664,8	336,6	2,23	-332,6	-662,3		
<i>IR</i>	10,82	10,79	10,8	10,82	10,85	10,77	10,78	10,79	10,81	10,83		
<i>PI</i>	153,4	189,8	222,8	251,8	276,4	282,6	302,2	316,5	325,5	328,7		
<i>QI</i>	300,4	276,6	248,2	215,7	179,7	184,6	145,7	104,6	61,9	18,5		
<i>II</i>	2,88	2,88	2,87	2,87	2,87	2,92	2,92	2,91	2,91	2,9		
<i>PII</i>	-152	-188,4	-221,3	-250,3	-274,8	-282,6	-302,2	-316,5	-325,4	-328,7		
<i>QII</i>	302,4	278,5	250,2	217,8	181,9	186,7	147,9	106,9	64,3	20,94		
<i>III</i>	2,97	2,96	2,95	2,95	2,94	2,98	2,98	2,98	2,97	2,97		
<i>PIII</i>	-16,7	26,7	69,5	110,8	150	153	189,3	222,3	251,2	275,7		
<i>QIII</i>	336,1	333,6	325,4	311,8	292,9	299,4	275,5	247	214,7	178,7		
<i>IIII</i>	2,87	2,86	2,84	2,83	2,83	2,87	2,86	2,85	2,84	2,84		
<i>PIV</i>	17	-26,4	-69,1	-110,4	-149,6	-153,4	-189,7	-222,7	-251,7	-276,2		
<i>QIV</i>	337,3	334,9	326,8	313,2	294,3	302,1	278,2	249,8	217,4	181,4		
<i>IV</i>	2,95	2,95	2,95	2,94	2,93	2,96	2,96	2,95	2,95	2,95		
<i>UCI</i>	231,9	231,2	229,5	226,8	223,2	225,8	221,2	215,6	209,2	201,8		
<i>ICI</i>	3,37	3,37	3,34	3,31	3,26	3,31	3,24	3,17	3,08	2,98		
<i>ULI</i>	111,4	124	136	147,5	158,3	159,9	169,9	179,2	187,8	195,5		
<i>ILI</i>	1,62	1,8	1,97	2,14	2,3	2,32	2,46	2,6	2,72	2,84		
<i>UCHI</i>	204,4	196,2	187,2	177,4	166,8	169	157,8	146	133,6	120,5		
<i>ICII</i>	2,98	2,88	2,75	2,63	2,49	2,52	2,38	2,22	2,07	1,911		
<i>ULII</i>	10,88	10,93	2,64	38,1	52,6	53,12	67,3	81,2	94,8	108		
<i>ILII</i>	0,16	0,16	0,34	0,55	0,76	0,77	0,97	1,18	1,37	1,57		
<i>UCIII</i>	231,9	231,2	229,5	226,8	223,1	225,8	221,2	215,6	209,2	201,8		
<i>ICIII</i>	2,9	2,91	2,89	2,85	2,8	2,84	2,78	2,72	2,64	2,55		
<i>ULIII</i>	9,87	12,6	26,1	40,4	54,9	55,17	69,4	83,4	97,02	110,2		
<i>ILIII</i>	2,92	2,91	2,87	2,85	2,81	2,84	2,78	2,72	2,64	2,55		
<i>UCIV</i>	231,9	231,2	229,5	226,8	223,1	225,8	221,2	215,6	209,2	201,8		
<i>ICIV</i>	2,92	2,91	2,89	2,87	2,83	2,85	2,8	2,74	2,67	2,59		
<i>ULIV</i>	10,88	10,93	23,6	38,11	52,6	53,1	67,3	81,2	94,8	108		
<i>ILIV</i>	0,14	0,13	0,29	0,48	0,66	0,67	0,85	1	1,19	1,36		
<i>U'SI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230		
<i>I'SI</i>	4,14	4,14	4,15	4,17	4,2	3,55	3,55	3,55	3,55	3,57		
<i>U''SI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230		
<i>I''SI</i>	7,34	7,36	7,37	7,37	7,36	8,07	8,08	8,08	8,08	8,06		
<i>U'S2</i>	114,3	114	113,7	113,4	113,2	114,9	114,6	114,3	114	113,8		
<i>I'S2</i>	8,29	8,24	8,2	8,16	8,15	7,21	7,14	7,08	7,03	7		
<i>U''S2</i>	113,6	113,2	112,7	112,3	112	113,1	112,6	112,1	111,7	111,4		

<i>I'S2</i>	14,68	14,66	14,6	14,6	14,51	16,1	16,07	16,02	15,96	15,88		
<i>U'RI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230		
<i>I'RI</i>	3,75	3,78	3,8	3,85	3,9	3,69	3,7	3,72	3,75	3,79		
<i>U''RI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230		
<i>I''RI</i>	7,5	7,5	7,5	7,5	7,55	7,2	7,2	7,21	7,22	7,22		
<i>U'R2</i>	116	115,7	115,4	115,1	114,8	116,4	116,2	115,9	115,6	115,3		
<i>I'R2</i>	7,58	7,6	7,57	7,6	7,64	7,5	7,5	7,48	7,48	7,49		
<i>U''R2</i>	118,9	118,6	118,3	117,9	117,4	118,5	118,2	117,8	117,4	117		
<i>I''R2</i>	15,3	15,3	15,3	15,25	15,22	14,65	14,6	14,6	14,57	14,5		
<i>U1,3,5</i>	113,5	113,1	112,8	112,5	112,2	113,3	113	112,7	112,5	112,2		
<i>U2,4,6</i>	114,5	114,1	113,7	113,3	113	114,6	114	113,7	113,3	112,9		
<i>U7,9,11</i>	117,5	117,3	117,1	116,8	116,6	117,6	117,4	117,2	116,9	116,6		
<i>U8,10,12</i>	117,5	117,1	116,7	116,2	115,8	117,3	116,9	116,5	116,1	115,7		
Ключи	I, II-2				VII, VIII-1		I, II-2				VII, VIII-1	
	III, IV-1				IX-, X-1		III, IV-1				IX, X-2	
	V, VI-2				XI, XII-2		V, VI-2				XI, XII-2	
<i>δ</i>	179,5	187	194,5	202	209,5	209,5	217	224,5	232	239,5		
<i>PS</i>	2556	2624	2649	2629	2567	2554	2622	2647	2627	2564		
<i>QS</i>	-656,9	-327,9	7,13	342,5	672,6	-652,1	-323	12,1	347,5	677,6		
<i>IS</i>	11,47	11,5	11,52	11,53	11,54	11,46	11,49	11,51	11,52	11,53		
<i>PR</i>	2388	2457	2483	2465	2403	2387	2456	2482	2464	2402		
<i>QR</i>	665,6	337,3	2,67	-332,4	-662,2	669,5	341	6,18	-329,1	-659,1		
<i>IR</i>	10,78	10,78	10,8	10,81	10,84	10,78	10,78	10,79	10,81	10,83		
<i>PI</i>	336,6	334,1	326	312,4	293,5	300,9	277	248,6	216,1	180,1		
<i>QI</i>	18,78	-24,7	-67,5	-108,9	-148,1	-151,1	-187,5	-220,5	-249,5	-274,1		
<i>II</i>	2,95	2,94	2,93	2,92	2,91	2,96	2,94	2,92	2,91	2,89		
<i>PII</i>	-336,6	-334,1	-326	-312,5	-293,6	-301,7	-277,9	-249,6	-217,1	-181,2		
<i>QII</i>	21,26	-22,2	-64,89	-106,2	-145,4	-149,7	-186,1	-219,1	-248,1	-272,6		
<i>III</i>	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01		
<i>PIII</i>	282,4	301,9	316,2	325	328,3	335,5	332,9	324,8	311,2	292,2		
<i>QIII</i>	182,8	144	102,9	60,3	16,9	17,55	-25,88	-68,6	-109,9	-149,1		
<i>IIII</i>	2,88	2,87	2,87	2,86	2,86	2,9	2,89	2,89	2,88	2,88		
<i>PIV</i>	-282,9	-302,5	-316,8	-325,7	-329	-337,5	-335	-326,9	-313,3	-294,5		
<i>QIV</i>	185,7	146,8	105,7	63,1	19,75	20,5	-22,95	-65,7	-107	-146,3		
<i>IV</i>	2,98	2,98	2,98	2,97	2,97	3	3,01	3,01	3,01	3,02		
<i>UCI</i>	204,2	196	187,1	177,3	166,8	169	157,8	146	133,6	120,5		
<i>ICI</i>	3,02	2,91	2,79	2,65	2,51	2,55	2,4	2,24	2,07	1,9		
<i>ULI</i>	197,9	204,7	210,6	215,6	219,7	222,3	225,4	227,5	228,7	228,8		
<i>III</i>	2,87	2,97	3,05	3,13	3,19	3,22	3,27	3,3	3,32	3,32		
<i>UCII</i>	121,9	108,6	94,8	80,5	66	67	52,4	37,65	23	10		
<i>ICII</i>	1,89	1,72	1,55	1,38	1,21	1,17	1	0,85	0,72	0,64		
<i>ULII</i>	109,3	121,9	134	145,4	156,3	158,6	168,6	177,9	186,4	194,2		
<i>IIII</i>	1,59	1,77	1,94	2,1	2,27	2,29	2,45	2,58	2,7	2,82		
<i>UCIII</i>	204,2	196	187,1	177,3	166,7	169	157,8	146	133,6	120,5		
<i>ICIII</i>	2,58	2,49	2,38	2,26	2,14	2,17	2,04	1,9	1,76	1,61		
<i>ULIII</i>	111,6	124,2	136,3	147,8	158,6	160,3	170,3	179,6	188,2	196		
<i>IIIII</i>	2,58	2,49	2,38	2,26	2,14	2,17	2,04	1,9	1,76	1,61		
<i>UCIV</i>	204,2	196	187,1	177,3	166,7	169	157,8	146	133,5	120,5		
<i>ICIV</i>	2,62	2,53	2,43	2,33	2,21	2,23	2,111	1,99	1,86	1,73		
<i>ULIV</i>	109,3	121,9	134	145,4	156,3	158,6	168,6	177,9	186,4	194,2		
<i>IIIV</i>	1,37	1,53	1,68	1,83	1,96	1	2,117	2,23	2,34	2,44		
<i>U'S1</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230		
<i>I'S1</i>	4,43	4,41	4,4	4,4	4,4	4,81	4,79	4,77	4,76	4,76		
<i>U''S1</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230		
<i>I''S1</i>	7,59	7,6	7,59	7,58	7,55	7,62	7,62	7,61	7,59	7,56		
<i>U'S2</i>	115,2	114,8	114,5	114,2	113,8	115,5	115,1	114,7	114,4	114		

<i>I'S2</i>	9,02	8,93	8,85	8,8	8,73	9,82	9,73	9,64	9,56	9,5	
<i>U''S2</i>	112,7	112,3	111,9	111,6	111,3	112,4	112	111,7	111,4	111,1	
<i>I'S2</i>	15,09	15,05	15	14,9	14,83	15,1	15,1	15	14,9	14,82	
<i>U'RI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	
<i>I'RI</i>	3,39	3,38	3,39	3,41	3,44	4,43	4,4	4,41	4,42	4,43	
<i>U''RI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	
<i>I''RI</i>	7,39	7,4	7,41	7,41	7,4	6,4	6,44	6,44	6,44	6,43	
<i>U'R2</i>	116,6	116,4	116,2	115,9	115,6	117,3	117	116,8	116,5	116,2	
<i>I'R2</i>	7,02	6,96	6,91	6,89	6,88	9,16	9,08	9,01	8,96	8,94	
<i>U''R2</i>	118,3	118	117,6	117,1	116,6	117,7	117,3	116,9	116,5	116,1	
<i>I''R2</i>	15,02	15	14,95	14,9	14,84	13,07	13,03	13	12,92	12,86	
<i>U1,3,5</i>	113,6	113,3	113,1	114,8	112,6	113,8	113,5	113,2	113	112,8	
<i>U2,4,6</i>	114,3	113,8	113,4	113	112,6	114,2	113,7	113,3	112,8	112,4	
<i>U7,9,11</i>	117,9	117,7	117,4	117,1	116,7	117,9	117,6	117,3	116,9	116,5	
<i>U8,10,12</i>	117	116,7	116,3	116	115,5	117,1	116,8	116,5	116,2	115,8	
Ключи	I, II-2				VII, VIII-1		I, II-1		VII, VIII-1		
	III, IV-1				IX, X-2		III, IV-1		IX, X-2		
	V, VI-2				XI, XII-1		V, VI-2		XI, XII-1		
<i>δ</i>	239,5	247	254,5	262	269,5	269,5	277	284,5	292	299,5	
<i>PS</i>	2554	2622	2646	2626	2563	2554	2622	2646	2626	2563	
<i>QS</i>	-650,4	-321,4	36	249	679	-651	-322	13,3	348,4	678,2	
<i>IS</i>	11,46	11,49	11,51	11,52	11,5	-11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	
<i>PR</i>	2389	2458	2483	2465	2403	2390	2459	2485	2466	2404	
<i>QR</i>	668,7	340	-17,4	-330,4	-660	666	338	2,5	-333	-663	
<i>IR</i>	10,79	10,79	10,8	10,81	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	
<i>PI</i>	184,2	145,3	101,4	61,56	18,1	-20,4	23	66,8	107,1	146,3	
<i>QI</i>	-280,7	-300,3	-315,5	-323,6	-327	335	332,6	324,5	311	292,2	
<i>II</i>	2,93	2,91	2,89	2,87	2,86	2,87	2,87	2,86	2,86	2,86	
<i>PII</i>	-185,4	-146,6	-102,8	-63	-19,6	13,2	-30	-72,7	-113,9	-152,9	
<i>QII</i>	-279,2	-298,8	-314	-322,1	-325	336,9	334	326,3	312,6	294	
<i>III</i>	3,01	3,01	3,01	3	3	2,95	2,95	2,94	2,94	2,93	
<i>PIII</i>	299,1	275,2	244,7	214,3	178	182,5	143,7	102,6	60	16,6	
<i>QIII</i>	-152,8	-189,2	-224,2	-251,1	-276	-281,4	-300,9	-315,2	-324,1	-327,3	
<i>PIII</i>	2,92	2,91	2,9	2,9	2,89	2,95	2,93	2,92	2,91	2,9	
<i>PIV</i>	-301,4	-277,5	-247,1	-216,7	-180	-185,7	-146,9	-105,8	-63,2	-19,8	
<i>QIV</i>	-149,9	-186,3	-221,4	-248,3	-273	-279,8	-299,4	-313,8	-322,7	-325,9	
<i>PIV</i>	3,06	3,07	3,08	3,09	3,09	3,08	3,08	3,09	3,09	3,09	
<i>UCI</i>	121,9	108,5	93,71	80,4	66,9	221,4	224,6	226,7	228	228,2	
<i>ICI</i>	1,89	1,71	1,52	1,34	1,15	3,22	3,27	3,31	3,33	3,34	
<i>ULI</i>	231,5	230,7	228,7	226,1	222,4	53,7	67,9	81,9	95,5	108,7	
<i>ILI</i>	3,36	3,35	3,32	3,28	3,22	0,78	0,98	1,19	1,39	1,58	
<i>UCII</i>	8,39	9,45	24,6	38,3	52,9	225	220,5	215	208,6	201,3	
<i>ICII</i>	0,52	0,54	0,65	0,78	0,95	3,3	3,2	3,1	3	2,9	
<i>ULII</i>	196,4	203,3	209,6	214,3	218,4	64,9	50,4	35,6	20,8	6,6	
<i>ILII</i>	2,85	2,95	3,04	3,12	3,17	0,94	0,73	0,52	0,3	0,09	
<i>UCIII</i>	121,9	108,5	93,7	80,4	65,9	66,8	52,1	37,3	22,4	8,1	
<i>ICIII</i>	1,62	1,47	1,3	1,16	1,01	1,09	0,96	0,84	0,74	0,68	
<i>ULIII</i>	198,3	205,1	211,4	216,1	220,2	222,4	225,5	227,7	228,9	229,1	
<i>ILIII</i>	1,62	1,47	1,3	1,16	1,01	1,09	0,96	0,84	0,74	0,68	
<i>UCIV</i>	121,8	108,5	93,7	80,4	65,9	66,8	52,1	37,3	22,4	8,1	
<i>ICIV</i>	1,74	1,61	1,47	1,35	1,22	1,16	1,04	0,93	0,84	0,82	
<i>ULIV</i>	196,4	203,3	209,6	214,3	218,4	221,4	224,6	226,7	228	228,2	
<i>ILIV</i>	2,47	2,55	2,63	2,7	2,74	2,78	2,82	2,85	2,86	2,87	
<i>U'SI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	
<i>I'SI</i>	6,05	6,03	6,01	6	6	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	
<i>U''SI</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	

<i>I'S1</i>	6,54	6,53	6,52	6,5	6,47	6,1	6,1	6,1	6,1	6
<i>U'S2</i>	115,4	114,9	114,4	114	113,6	115,2	114,7	114,2	113,8	113,3
<i>I'S2</i>	12,27	12,18	12,08	12	11,9	12,8	12,7	12,6	12,5	12,5
<i>U'S2</i>	112,5	112,2	111,9	111,7	111,6	112,7	112,4	112,2	112	111,8
<i>I'S2</i>	12,9	12,85	12,78	12,7	12,6	12	12	11,9	11,8	11,7
<i>U'R1</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
<i>I'R1</i>	4,83	4,81	4,8	4,8	4,8	6,03	6	6	6	6
<i>U'R1</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
<i>I'R1</i>	6,1	6,11	6,11	6,12	6,1	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
<i>U'R2</i>	117,5	117,3	117	116,7	116,4	118	117,7	117,3	116,9	116,5
<i>I'R2</i>	9,97	9,88	9,8	9,75	9,7	12,3	12,2	12,2	12,1	12,1
<i>U'R2</i>	117,4	117,1	116,7	116,3	115,9	116,9	116,7	116,4	116,1	115,7
<i>I'R2</i>	12,39	12,35	12,3	12,2	12,2	9,9	9,9	9,8	9,8	9,7
<i>U1,3,5</i>	114,2	113,9	113,6	113,3	113,1	114,3	113,9	113,7	113,4	113,1
<i>U2,4,6</i>	113,8	113,3	112,8	112,4	112,1	113,7	113,2	112,8	112,4	112
<i>U7,9,11</i>	117,8	117,5	117,2	116,8	116,4	117,5	117,2	116,8	116,8	116
<i>U8,10,12</i>	117,1	116,8	116,5	116,2	115,9	117,4	117,2	116,9	116,6	116,2
Ключи	I, II-1				VII, VIII-1		I, II-1		II, VIII-1	
	III, IV-2				IX, X-2		II, IV-2		IX, X-2	
	V, VI-2				XI, XII-1		V, VI-1		XI, XII-1	
δ	299,5	307	314,5	322	329,5	329,5	337	344,5	352	359,5
<i>PS</i>	2552	2620	2644	2624	2561	2554	2622	2646	2626	2563
<i>QS</i>	-650	-320,9	13,8	348,8	678,3	-654,8	-326	8,1	342,9	672,3
<i>IS</i>	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
<i>PR</i>	2391	2459	2484	2466	2403	2393	2462	2487	2468	2405
<i>QR</i>	664,6	335,7	0,71	-334,7	-664,8	658,4	329,7	5,2	-340,5	-670,5
<i>IR</i>	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,9
<i>PI</i>	149,9	186,3	219,3	248,3	272,9	280,6	300,2	314,6	323,6	326,9
<i>QI</i>	299	275,3	246,9	214,6	178,7	183,5	144,7	103,7	61,2	17,8
<i>II</i>	2,89	2,88	2,89	2,89	2,88	2,9	2,9	2,9	2,9	2,88
<i>PII</i>	-156,7	-193	-225,8	-254,7	-279	-286,2	-305,7	-319,9	-328,7	-331,9
<i>QII</i>	300,7	276,9	248,5	216,1	180,3	183,6	144,9	103,9	61,4	18,1
<i>III</i>	2,96	2,96	2,96	2,95	2,94	2,98	2,98	2,98	2,97	2,96
<i>PIII</i>	-18,4	24,98	67,7	108,9	148	152,4	188,7	221,6	250,5	275
<i>QIII</i>	336,3	333,9	325,8	312,2	293	300,6	276,8	248,5	216,1	180,3
<i>IIII</i>	2,87	2,86	2,86	2,85	2,8	2,87	2,86	2,85	2,84	2,84
<i>PIV</i>	15,1	-28,2	-70,8	-112,1	-151,2	-154,9	-191,2	-224,1	-253	-277
<i>QIV</i>	337,6	335,1	327	313,3	294	300,6	276,7	248,4	215,9	180
<i>IIIV</i>	2,96	2,95	2,95	2,94	2,94	3	2,96	2,95	2,95	2,9
<i>UCI</i>	230,9	230,2	228,4	225,7	222	225,2	220,7	215,1	208,7	201
<i>ICI</i>	3,38	3,37	3,35	3,3	3,27	3,31	3,2	3,16	3,07	2,97
<i>ULI</i>	110,1	122,7	134,8	146,3	157,2	159,6	169,7	179	187,5	195,3
<i>ILI</i>	1,59	1,78	1,96	2,1	2,3	2,32	2,46	2,6	2,7	2,8
<i>UCII</i>	203,7	195,6	186,7	177	166,6	168,5	157,5	145,8	133,4	120,6
<i>ICII</i>	3	2,84	2,72	2,6	2,4	2,45	2,3	2,13	1,96	1,8
<i>ULII</i>	7,3	10,9	24,9	39,5	54	55,6	69,5	83,3	96,7	109,8
<i>ILII</i>	0,11	0,16	0,36	0,57	0,78	0,81	1,01	1,2	1,4	1,6
<i>UCIII</i>	230,9	230,2	228,4	225,7	222	225,2	220,7	215	208,7	201,3
<i>ICIII</i>	2,91	2,9	2,88	2,85	2,8	2,84	2,78	2,7	2,63	2,5
<i>ULIII</i>	7,3	10,9	24,9	39,5	54	55,6	69,6	83,3	96,7	109,8
<i>ILIII</i>	2,91	2,9	2,88	2,85	2,8	2,84	2,8	2,7	2,6	2,5
<i>UCIV</i>	231,8	231	229,3	226,6	222,8	225	220,5	215	208,5	201
<i>ICIV</i>	2,93	2,92	2,9	2,87	2,82	2,8	2,8	2,7	2,64	2,5
<i>ULIV</i>	7,3	10,9	24,9	39,5	54	55,6	69,5	83,3	96,7	109,8
<i>ILIV</i>	0,09	0,14	0,3	0,49	0,68	0,7	0,87	1,05	1,22	1,4
<i>U'S1</i>	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230

$I'S1$	7,15	7,13	7,1	7,1	7,1	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
$U''S1$	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
$I''S1$	4,9	4,9	4,9	4,9	4,8	4,8	4,8	4,9	4,85	4,8
$U'S2$	114,7	114,2	113,6	113,1	112,7	114,3	113,8	113,3	112,9	112,4
$I'S2$	14,4	14,3	14,2	14,2	14,1	13,7	13,6	13,5	13,5	13,4
$U''S2$	113,2	113	112,8	112,6	112,5	113,6	113,3	113,1	112,9	112,7
$I''S2$	9,6	9,6	9,5	9,5	9,4	9,6	9,6	9,5	9,5	9,4
$U'R1$	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
$I'R1$	6,2	6,1	6,1	6,1	6,2	6,9	6,8	6,8	6,9	6,9
$U''R1$	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
$I''R1$	4,6	4,6	4,7	4,7	4,7	4	4,05	4,1	4,09	4,1
$U'R2$	117,8	117,5	117,1	116,7	116,2	117,9	117,4	117	116,5	116
$I'R2$	12,6	12,5	12,4	12,4	12,4	13,9	13,8	13,8	13,8	13,7
$U''R2$	117,1	116,8	116,6	116,3	116	117	116,9	116,7	116,5	116,3
$I''R2$	9,5	9,5	9,5	9,4	9,4	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
$U1,3,5$	114,5	114,2	113,9	113,5	113,2	114,5	114,1	113,7	113,4	113,1
$U2,4,6$	113,4	113	112,6	112,2	112	113,6	113,2	112,9	112,5	112,3
$U7,9,11$	117,4	117	116,7	116,3	115,9	117,1	116,8	116,4	116,1	115,7
$U8,10,12$	117,6	117,3	117,1	116,7	116,4	118	117,7	117,4	117,1	116,1

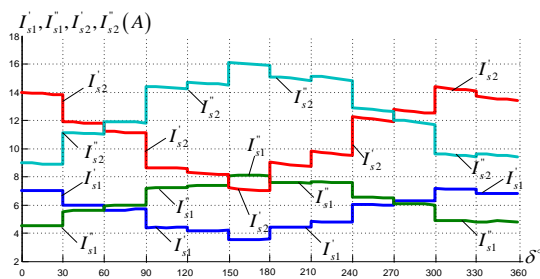


Рис. А6.1 Токи обмоток трансформатора передающего узла S

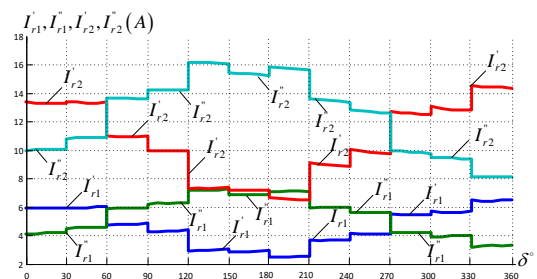


Рис. А6.2 Токи обмоток трансформатора приемного узла R

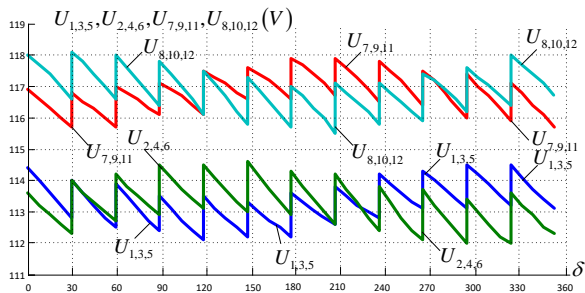


Рис. А6.3 Напряжения в узлах на стороне НН

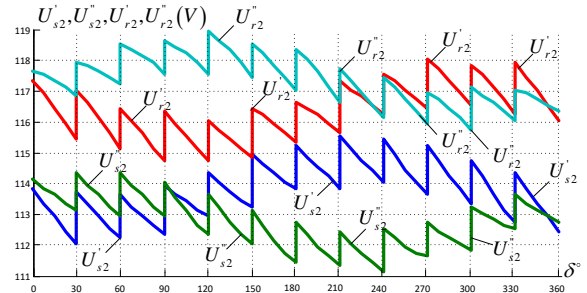


Рис.А6.4 Напряжения обмоток на стороне НН

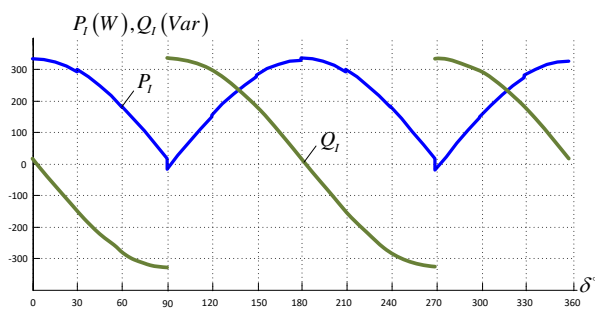


Рис. А6.5 Активная и реактивная мощность элементов первого рода передающего узла

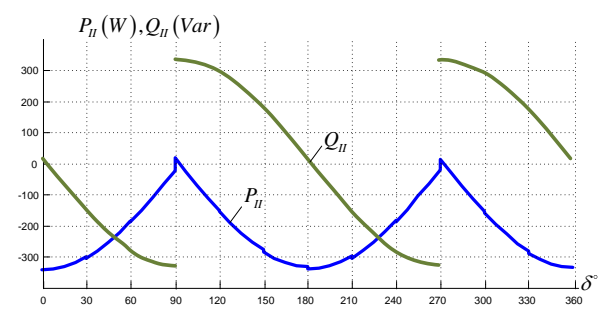


Рис. А6.6 Активная и реактивная мощность элементов первого рода приемного узла

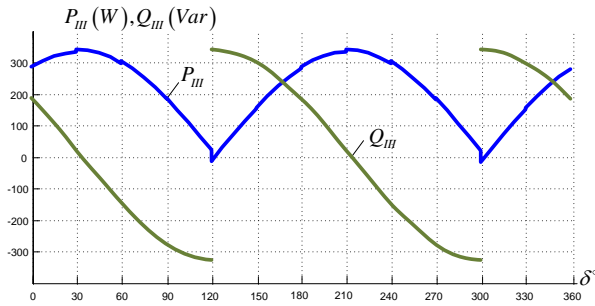


Рис. А6.7 Активная и реактивная мощность элементов второго рода передающего узла

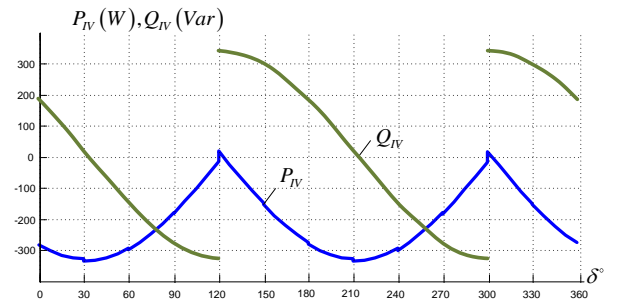


Рис. А6.8 Активная и реактивная мощность элементов второго рода приемного узла

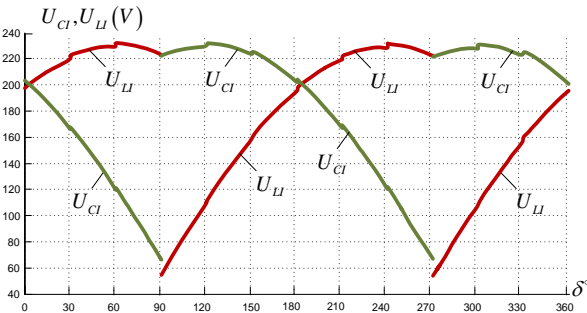


Рис. А6.9 Напряжения преобразовательных элементов первого рода передающего узла

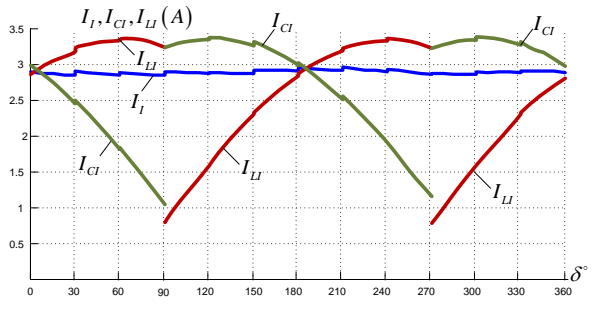


Рис. А6.10 Токи преобразовательных элементов первого рода передающего узла

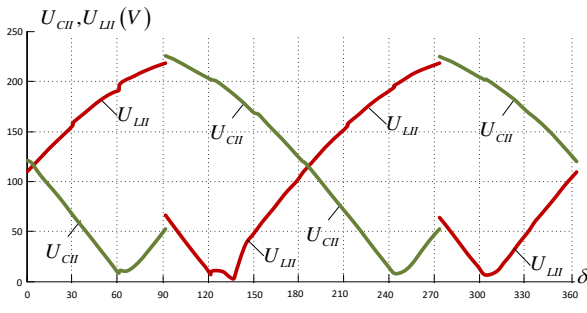


Рис. А6.11 Напряжения преобразовательных элементов первого рода приемного узла

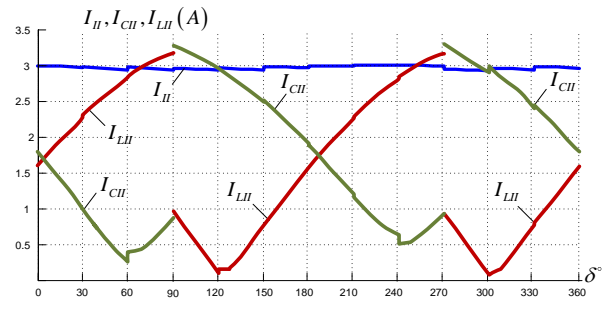


Рис. А6.12 Токи преобразовательных элементов первого рода приемного узла

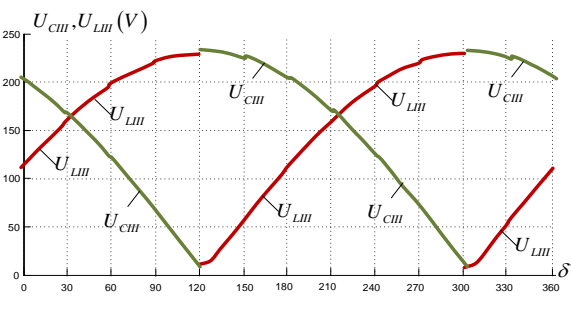


Рис. А6.13 Напряжения преобразовательных элементов второго рода передающего узла

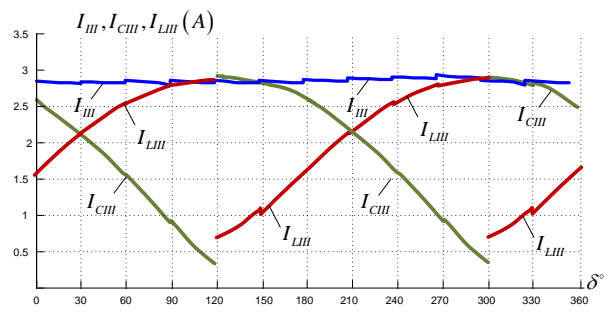


Рис. А6.14 Токи преобразовательных элементов второго рода передающего узла

Приложение А7. Результаты расчетных экспериментов при имитационном моделировании работы преобразователя частоты по схеме «зигзаг»

Таблица А7.1 – Работа на активную нагрузку

количество позиций	δP_s	THD(I_s)	δP_r	THD(I_r)
60-50 Гц				
24	1.01	1.13	1.12	2.06
48	1.21	0.83	1.12	0.98
50-60 Гц				
24	1.31	1.64	0.94	1.89
48	1.3	1.37	0.93	0.74
50-49 Гц				
24	0.69	0.76	2.84	2.12
48	1.2	0.98	1.4	0.83

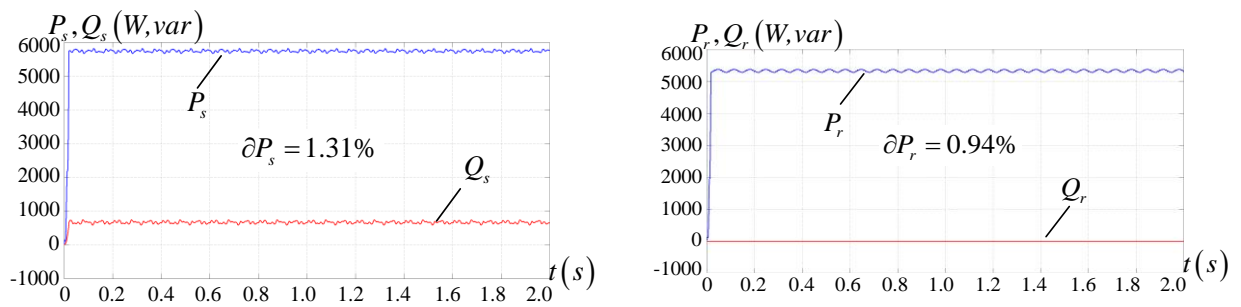


Рис.А7.1.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку. 24 позиционное регулирование.

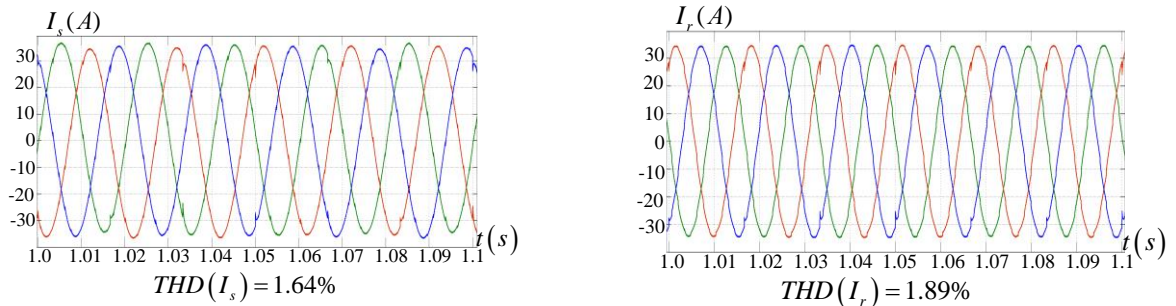


Рис.А7.1.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку. 24 позиционное регулирование.

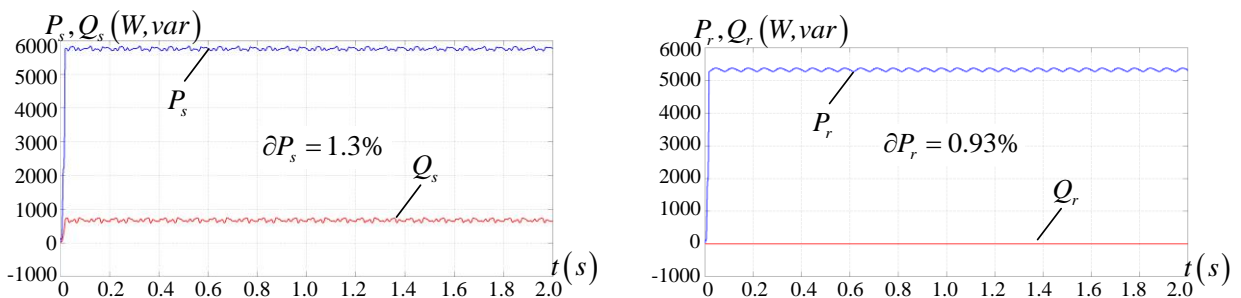


Рис.А7.2.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку. 48 позиционное регулирование.

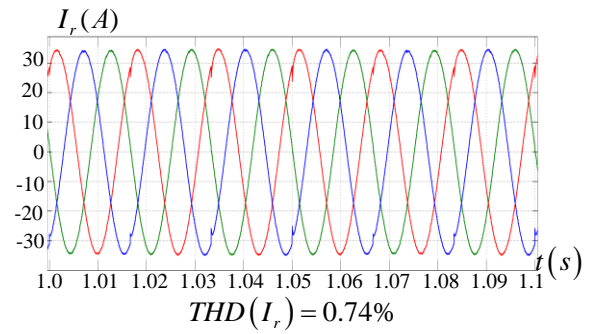
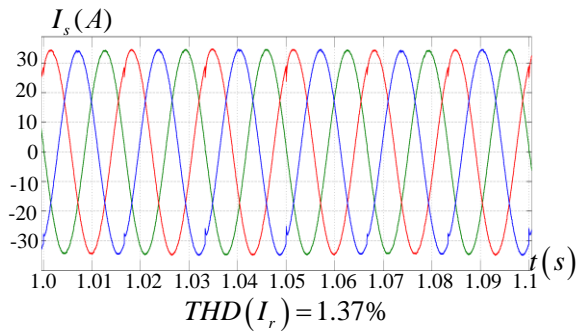


Рис.А7.2.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку. 48 позиционное регулирование.

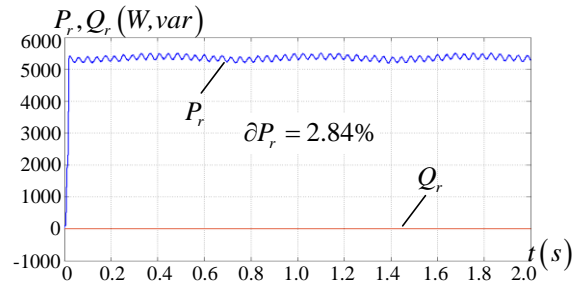
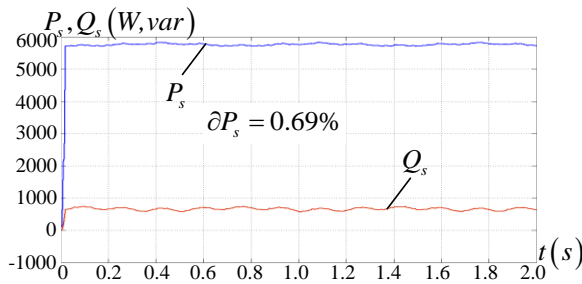


Рис.А7.3.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку. 24 позиционное регулирование.

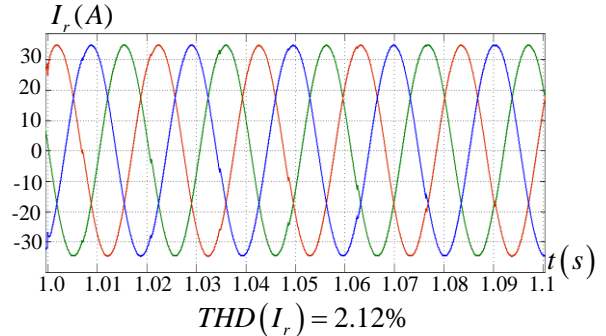
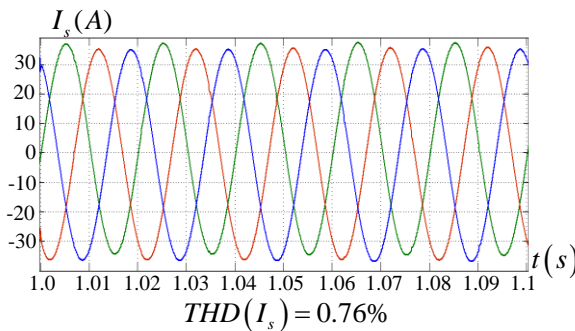


Рис.А7.3.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку. 24 позиционное регулирование.

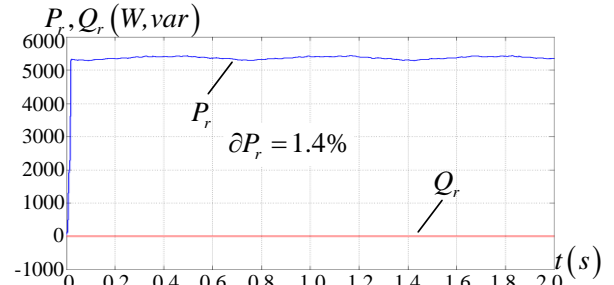
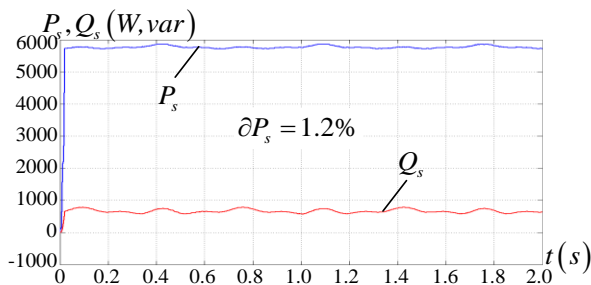


Рис.А7.4.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку. 48 позиционное регулирование.

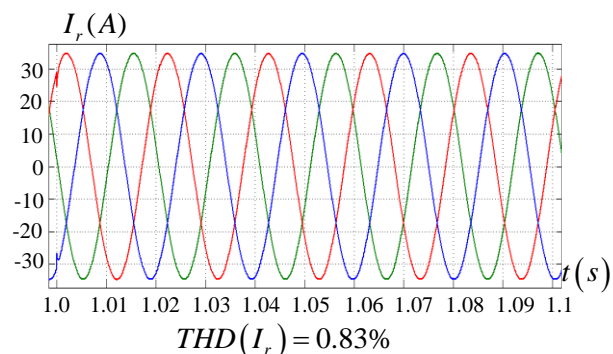
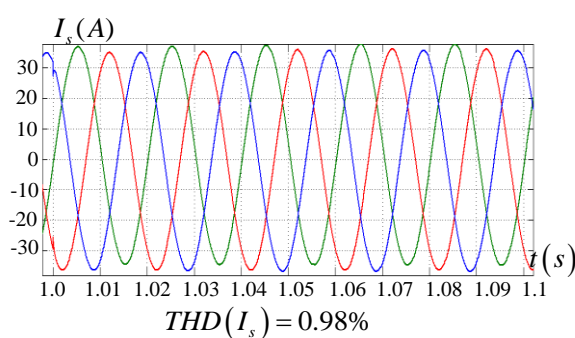


Рис.А7.4.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку. 48 позиционное регулирование.

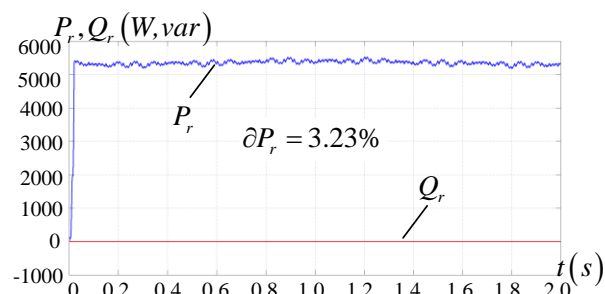
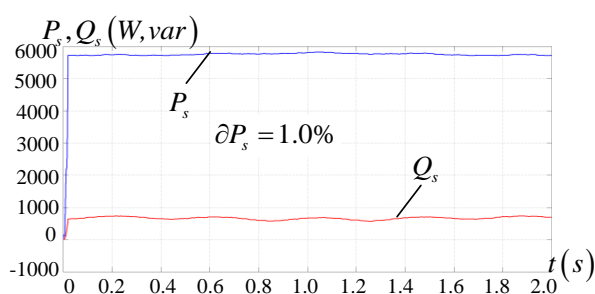


Рис.А7.5.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку. 24 позиционное регулирование.

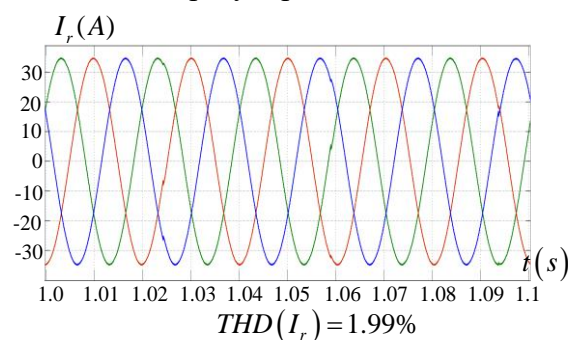
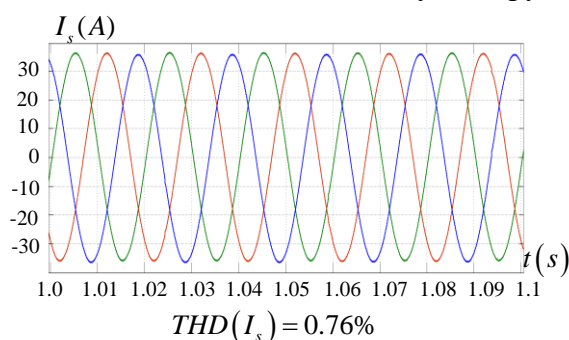


Рис.А7.5.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку. 24 позиционное регулирование.

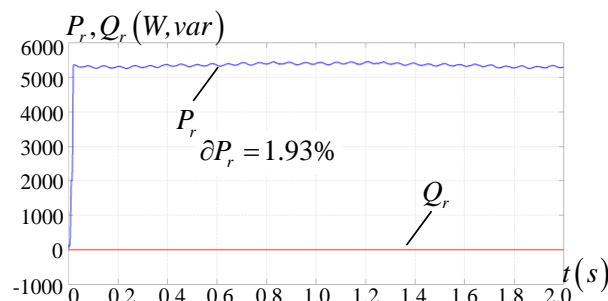
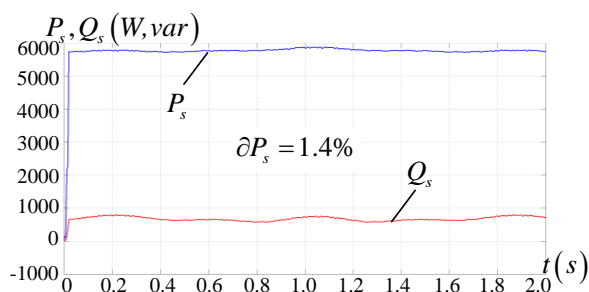


Рис.А7.6.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку. 48 позиционное регулирование.

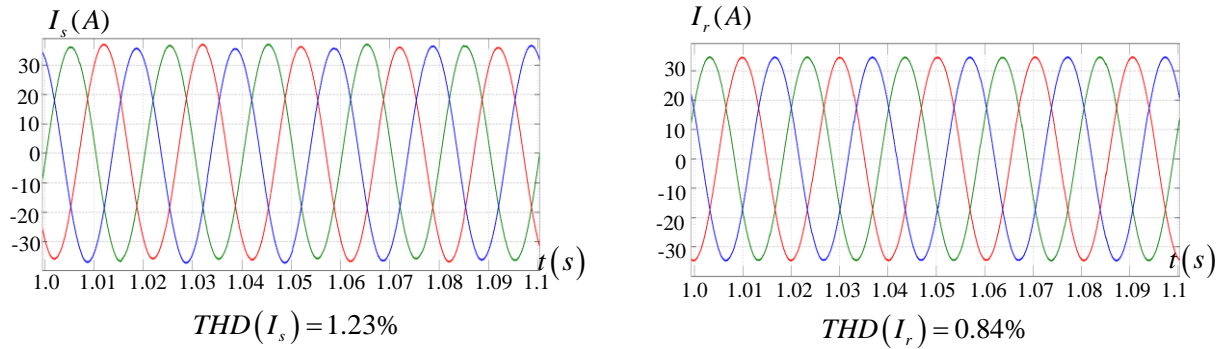


Рис.А7.6.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку. 48 позиционное регулирование.

Таблица А7.2. – Работа на активную нагрузку через ЛЭП

Количество позиций	δP_s	THD(I_s)	δP_r	THD(I_r)
60-50Гц, $R_n=18/2+1.3\text{Ом}$				
24	0.57	3.28	1.03	1.27
48	0.83	1.29	1.07	0.9
50-60Гц, $R_n=18/2+2\text{Ом}$				
24	0.91	3.53	0.85	1.31
48	0.77	2.19	0.85	0.87
50-49 Гц, $R_n=18/2+1.3\text{Ом}$				
24	0.92	1.75	2.39	2.27
48	0.76	1.21	0.91	0.85

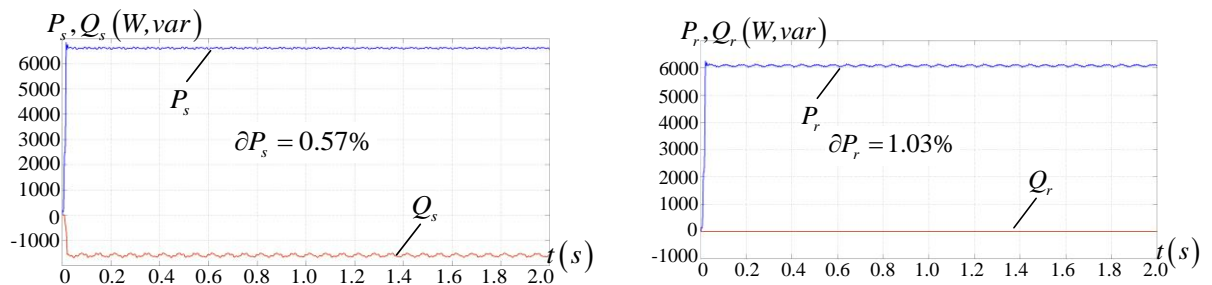


Рис.А7.7.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 60/50Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24 позиционное регулирование.

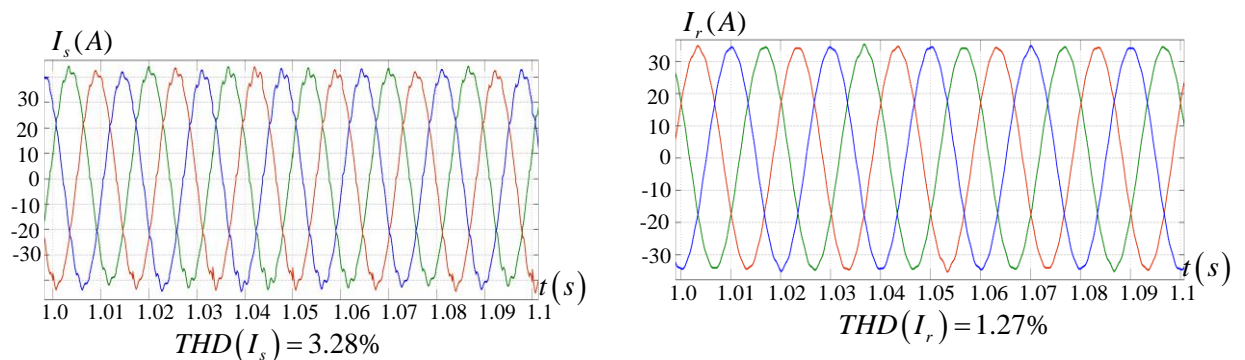


Рис.А7.7.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 60/50Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24 позиционное регулирование.

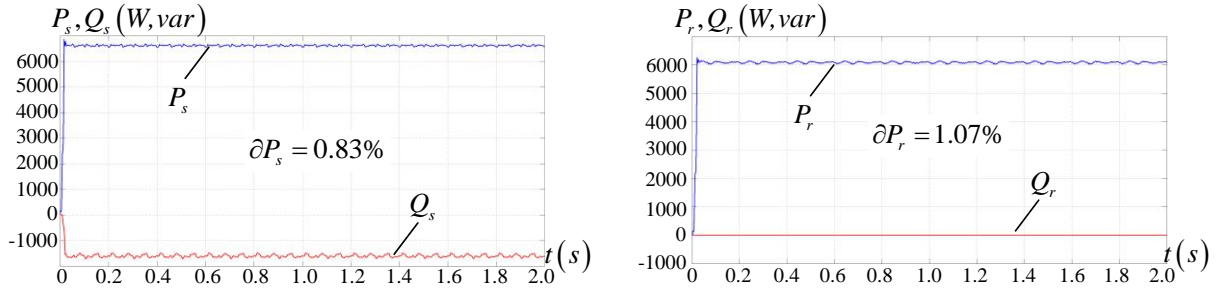


Рис.А7.8.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 60/50Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48 позиционное регулирование.

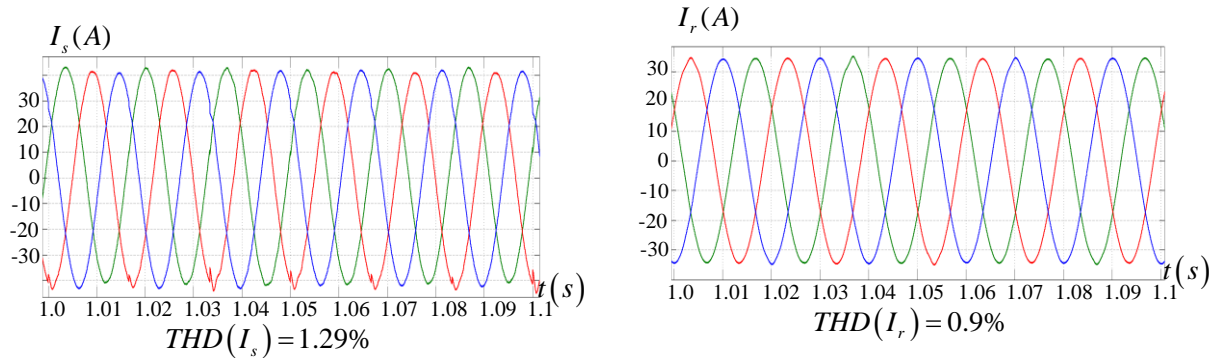


Рис.А7.8.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 60/50Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48 позиционное регулирование.

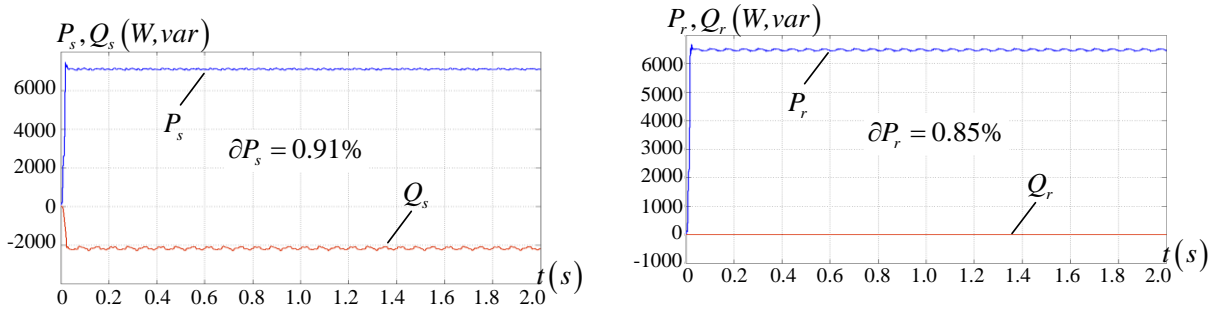


Рис.А7.9.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24 позиционное регулирование.

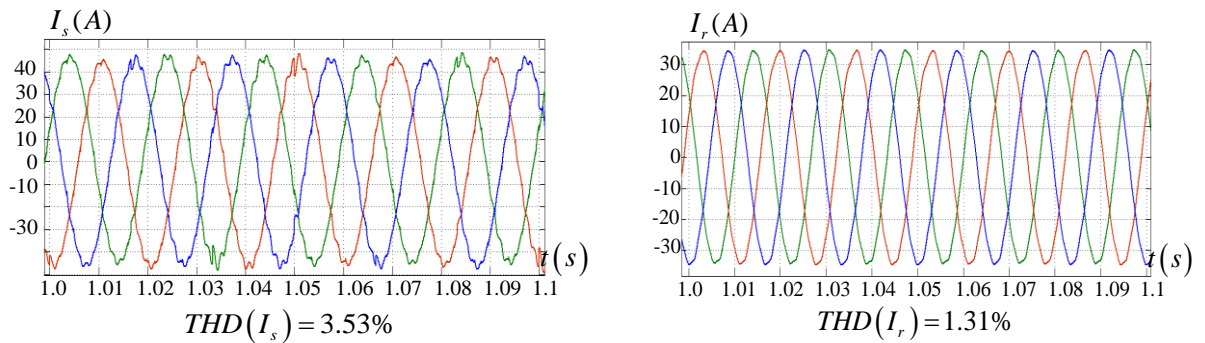


Рис.А7.9.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24 позиционное регулирование.

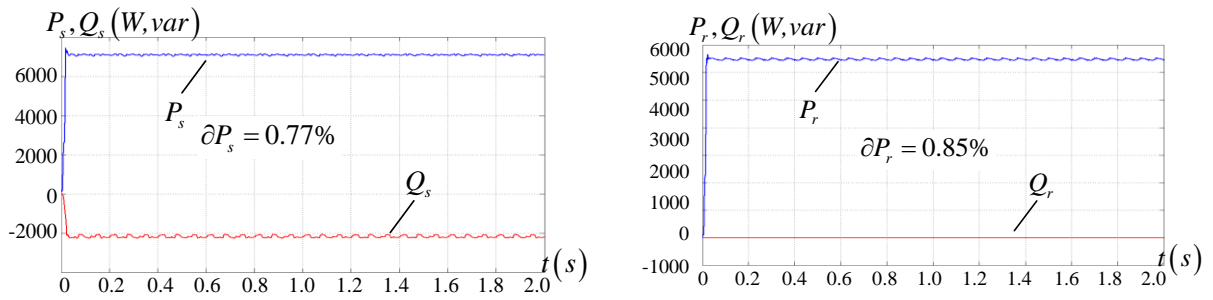


Рис.А7.10.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48 позиционное регулирование.

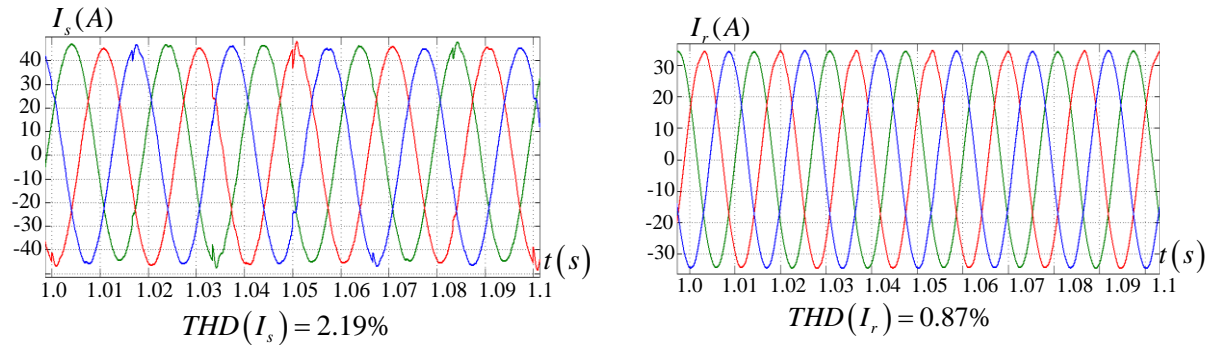


Рис.А7.10.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48 позиционное регулирование.

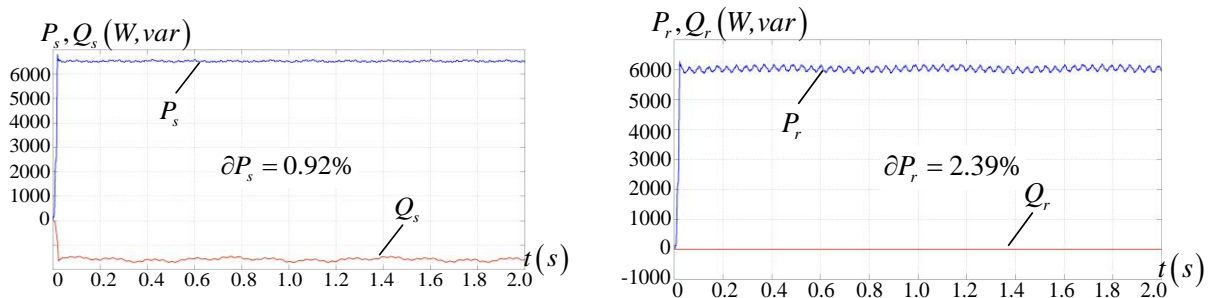


Рис.А7.11.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24 позиционное регулирование.

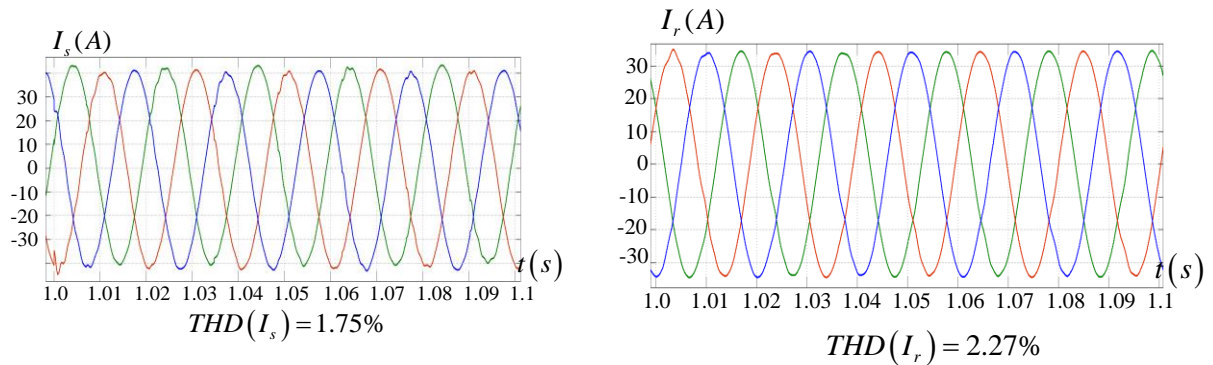


Рис.А7.11.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24 позиционное регулирование.

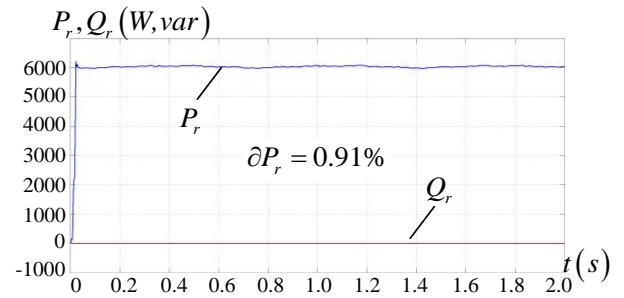
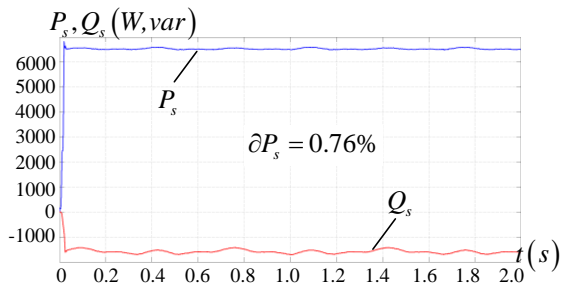


Рис.А7.12.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48 позиционное регулирование.

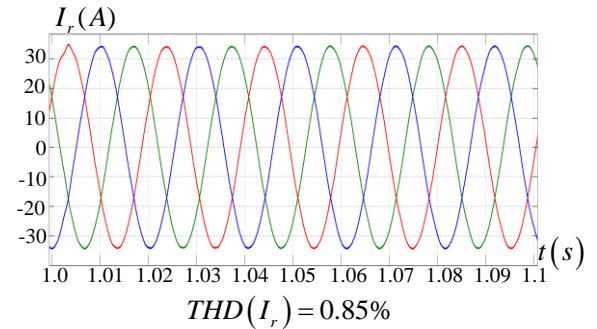
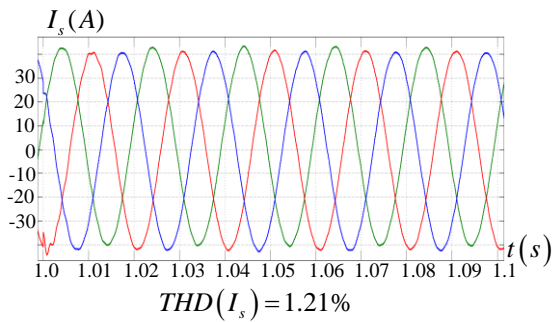


Рис.А7.12.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48 позиционное регулирование.

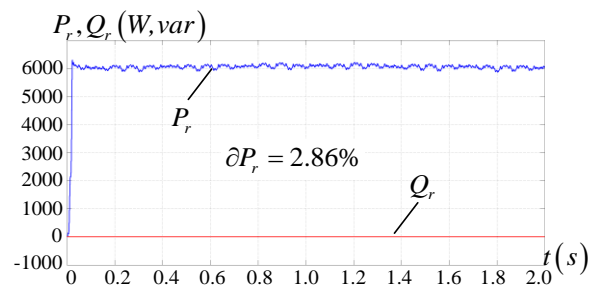
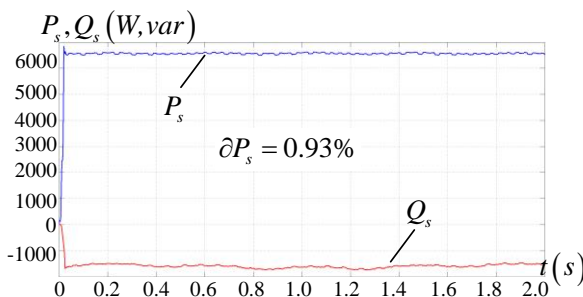


Рис.А7.13.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24 позиционное регулирование.

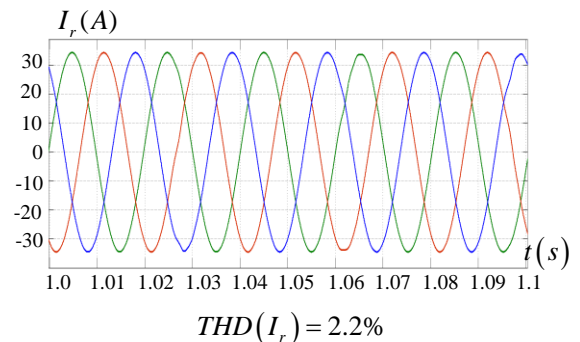
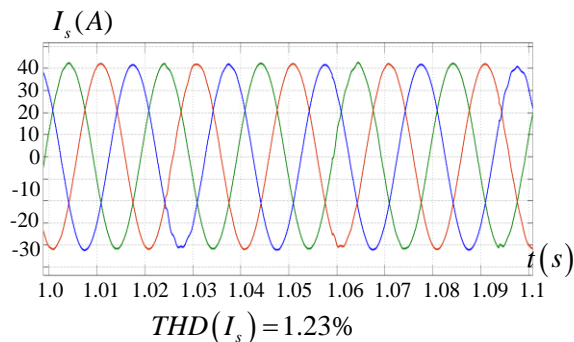


Рис.А7.13.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24 позиционное регулирование.

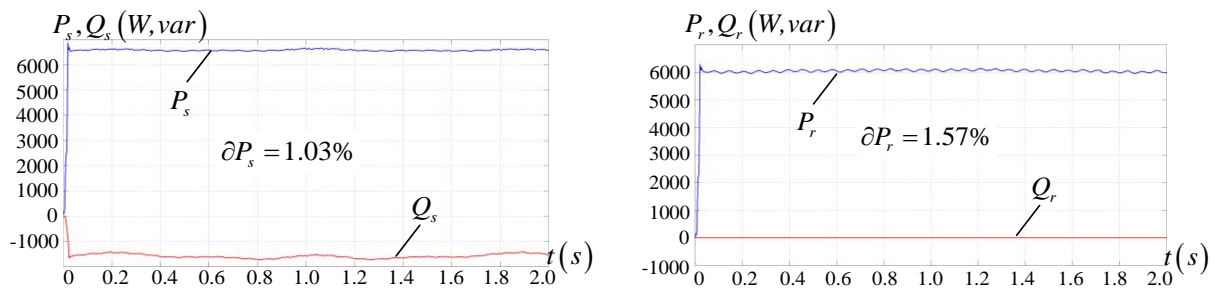


Рис.А7.14.а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48 позиционное регулирование.

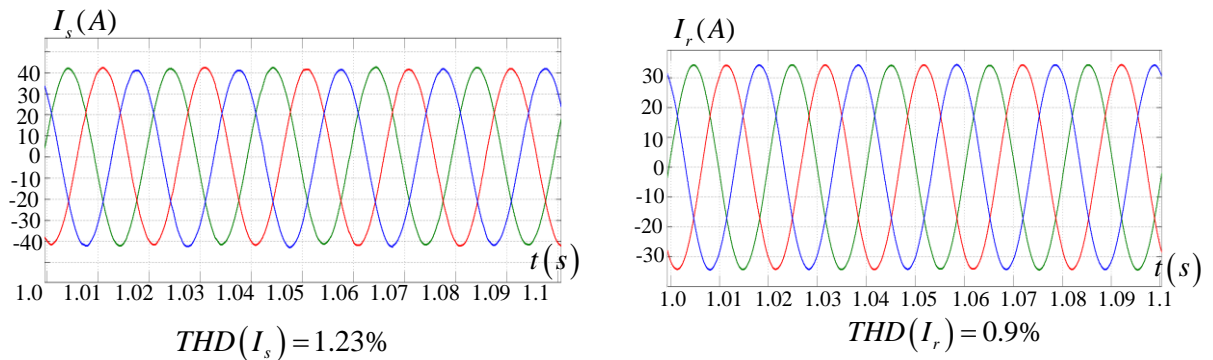


Рис.А7.14.б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48 позиционное регулирование.

Таблица А7.3. – Работа на приемную систему с мощностями S и R через линию (обе системы одинаковой мощности)

кол-во поз-ий	δP_s	THD(I_s)	δP_r	THD(I_r)	δs_r
60-50					
24	3.85	4.52	4.68	2.92	-30°
48	2.18	1.83	2.27	1.73	-31°
50-60					
24	1.88	5.96	1.66	3.58	-35°
48	1.66	4.29	1.81	1.0	-35°
50-49					
24	5.49	5.98	6.39	6.4	-30°
48	2.75	5.15	2.44	5.44	-30.3°

Таблица А7.4. – Согласование работы передающей 60Гц и приемной 50Гц систем через ЛЭП 30° при различных соотношениях мощностей объединяемых энергосистем.

кол-во поз-ий	δP_s	THD(I_s)	THD(U_s)	δP_r	THD(I_r)	δs_r
Мощность передающей и приемной системы 1:10						
24	1.94	4.42	-	2.46	2.94	-30.5°
48	2.1	1.81	-	2.28	1.72	-31°
Мощность передающей и приемной системы 1:100						
24	1.94	3.96	1.48	2.46	3.29	-31.5°
48	2.12	1.63	0.78	2.2	1.73	-31.8°
Мощность передающей и приемной системы 1:1000						
24	1.44	1.13	5.0	2.02	1.181	-41.5°
48	1.51	0.91	2.69	1.91	1.41	-42.5°

Продолжение таблицы А7.4.

кол-во поз-ий	δP_s	THD(Is)	δP_r	THD(Ir)	THD(Ur)	δs_r
Мощность передающей и приемной системы 10:1						
24	2.02	4.51	2.37	2.97	-	-30.5°
48	2.19	1.82	2.28	1.72	-	-31°
Мощность передающей и приемной системы 100:1						
24	1.89	4.76	2.5	3.84	0.9	-32°
48	2.09	1.8	2.26	1.89	0.22	-32°
Мощность передающей и приемной системы 1000:1						
24	1.55	3.62	1.77	1.8	2.15	-40°
48	1.63	2.26	1.77	1.67	1.38	-40.5°

Таблица А7.5. – Согласование работы передающей 50Гц и приемной 60Гц систем через ЛЭП 30° при различных соотношениях мощностей объединяемых энергосистем.

кол-во поз-ий	δP_s	THD(Is)	THD(Us)	δP_r	THD(Ir)	δs_r
Мощность передающей и приемной системы 1:10						
24	1.79	5.75	-	1.66	3.47	-35°
48	1.67	4.17	-	1.81	1.0	-35°
Мощность передающей и приемной системы 1:100						
24	1.72	3.97	2.25	1.68	2.42	-35.5°
48	1.42	2.9	1.74	1.72	1.0	-36°
Мощность передающей и приемной системы 1:1000						
24	1.19	1.46	7.94	1.29	1.67	-46°
48	1.11	1.39	5.49	1.39	1.02	-45°
Мощность передающей и приемной системы 10:1						
24	1.9	5.9	1.68	3.58	-	-34.5°
48	1.66	4.25	1.77	1.01	-	-34°
Мощность передающей и приемной системы 100:1						
24	1.71	5.0	1.57	3.14	0.45	-35.5°
48	1.57	3.44	1.73	1.03	0.06	-36°
Мощность передающей и приемной системы 1000:1						
24	1.38	4.89	1.19	1.86	2.51	-44.5°
48	1.29	3.11	1.35	1.1	0.72	-44°

Таблица А7.6. – Согласование работы передающей 50Гц и приемной 49Гц систем через ЛЭП 30° при различных соотношениях мощностей объединяемых энергосистем.

кол-во поз-ий	δP_s	THD(Is)	THD(Us)	δP_r	THD(Ir)	δs_r
Мощность передающей и приемной системы 1:10						
24	5.48	5.95		6.3	6.4	-30°
48	2.62	5.06		2.4	5.37	-31°
Мощность передающей и приемной системы 1:100						
24	4.69	4.33	0.81	6.11	4.93	-31°
48	2.41	3.53	0.6	2.35	3.85	-31.5°
Мощность передающей и приемной системы 1:1000						
24	3.96	5.79	4.79	5.27	9.0	-41°
48	1.67	2.47	2.47	2.14	3.6	-42.5°
Мощность передающей и приемной системы 10:1						
24	5.4	5.96	6.3	6.42	-	-30°
48	2.66	5.13	2.52	5.45	-	-30.5
Мощность передающей и приемной системы 100:1						
24	5.44	4.53	6.15	5.22	0.47	-30.5°
48	2.89	3.56	1.89	3.99	0.34	-31.5°
Мощность передающей и приемной системы 1000:1						
24	4.2	5.14	5.0	5.28	3.46	-39.5°
48	1.92	1.59	1.82	1.84	1.37	-40.5°

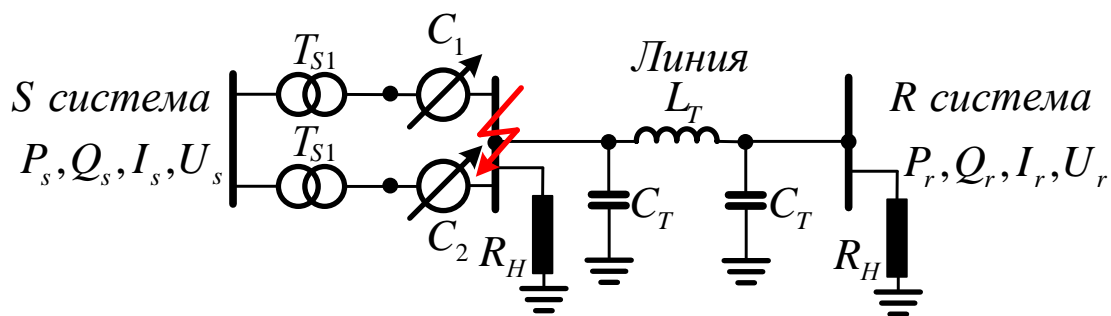


Рис. А7.15 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах со стороны приемной системы

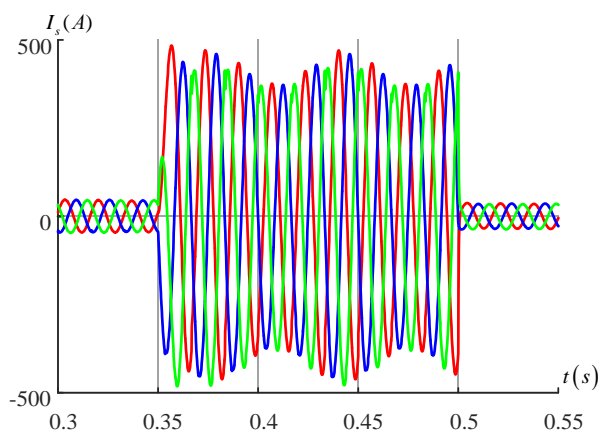


Рис. А7.16 Ток на передающей системе в момент возникновения короткого замыкания

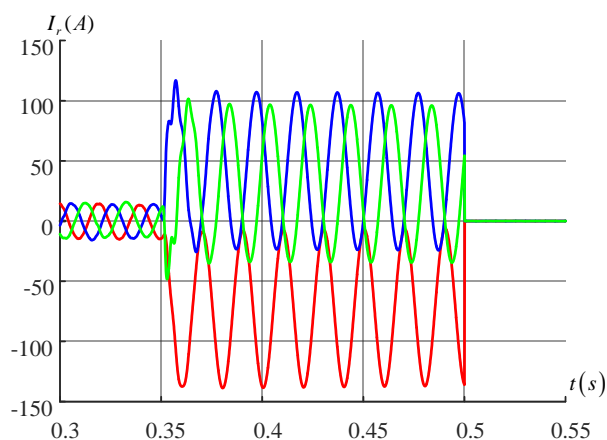


Рис. А7.17 Ток на приемной системе в момент возникновения короткого замыкания

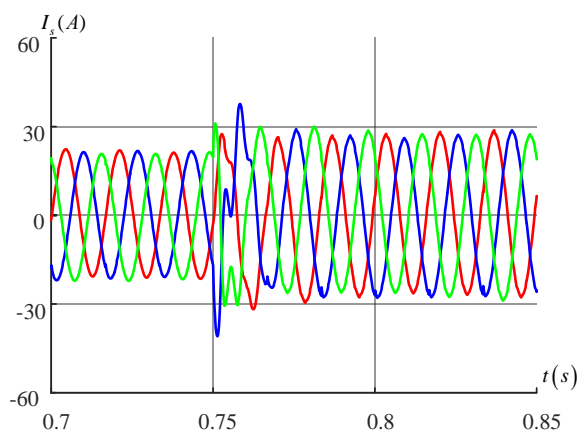


Рис. А7.18 Ток на передающей системе в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

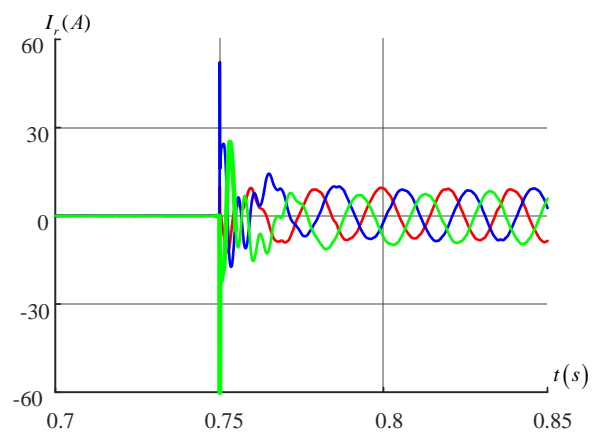


Рис. А7.19 Ток на приемной системе в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

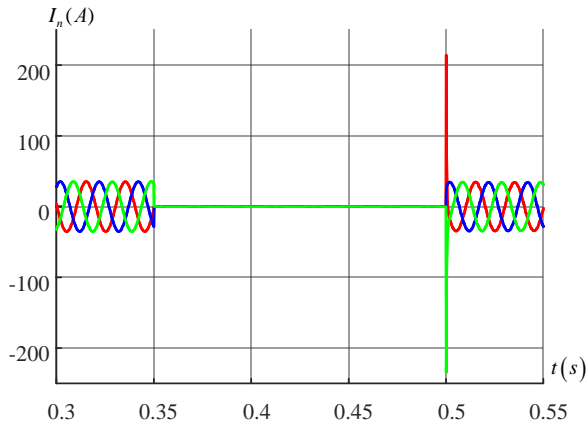


Рис. А7.20 Токи на нагрузке в момент возникновения короткого замыкания

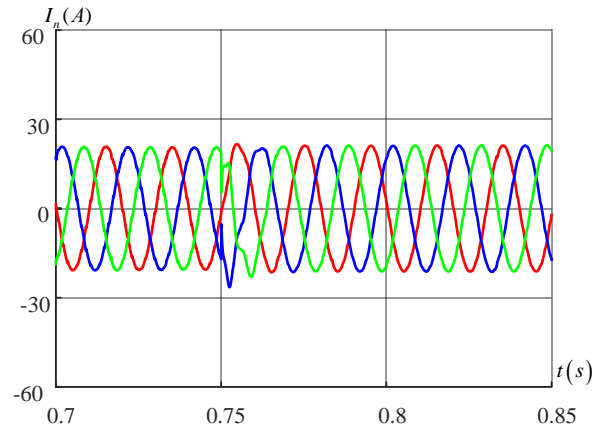


Рис. А7.21 Токи на нагрузке в момент восстановления асинхронной межсистемной СВЯЗИ

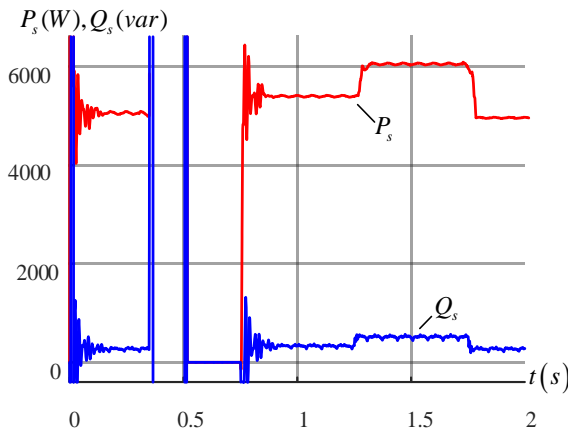


Рис. А7.22 Мощности на передающей системе

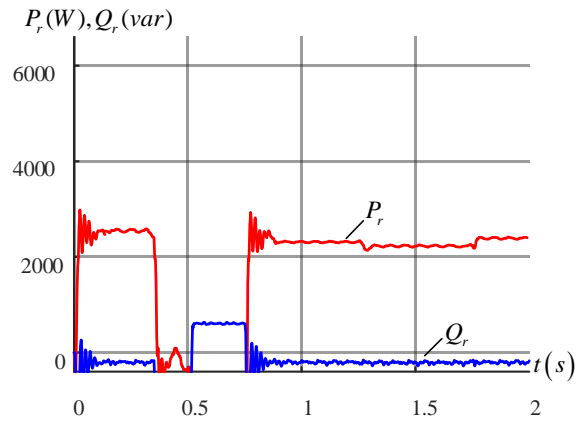


Рис. А7.23 Мощности на приемной системе

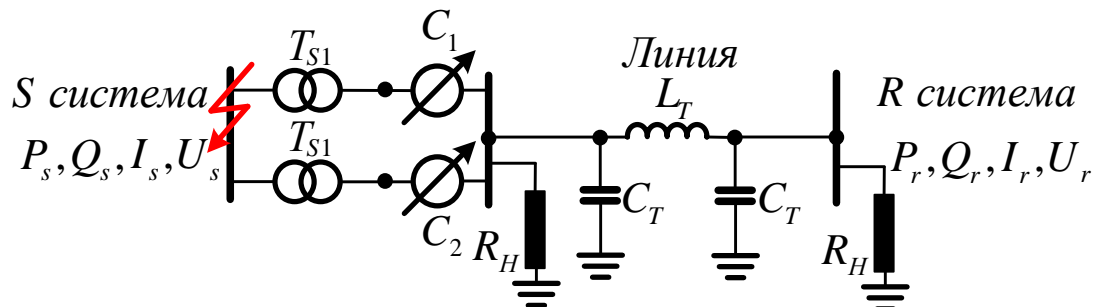


Рис. А7.24 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах со стороны приемной системы

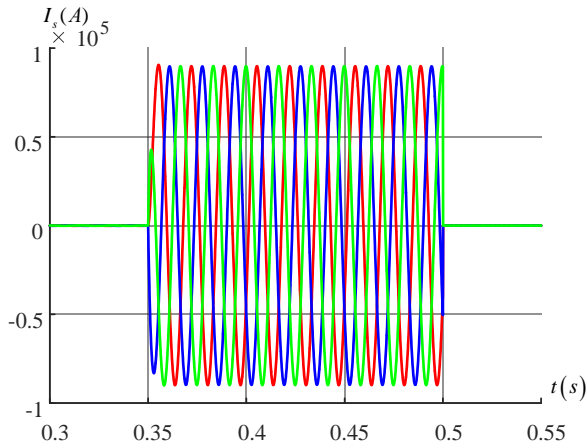


Рис. А7.25 Ток на передающей системе в момент возникновения короткого замыкания

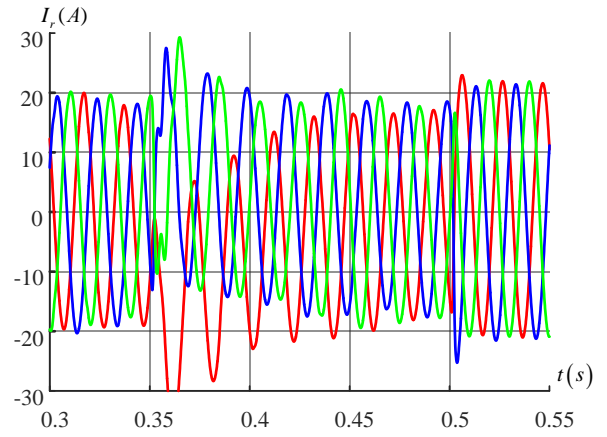


Рис. А7.26 Ток на приемной системе в момент возникновения короткого замыкания

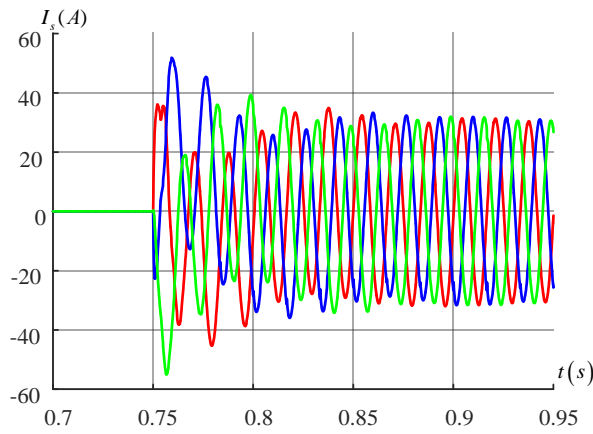


Рис. А7.27 Ток на передающей системе в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

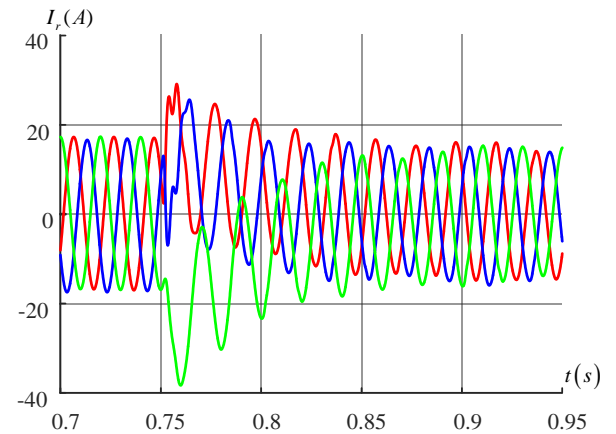


Рис. А7.28 Ток на приемной системе в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

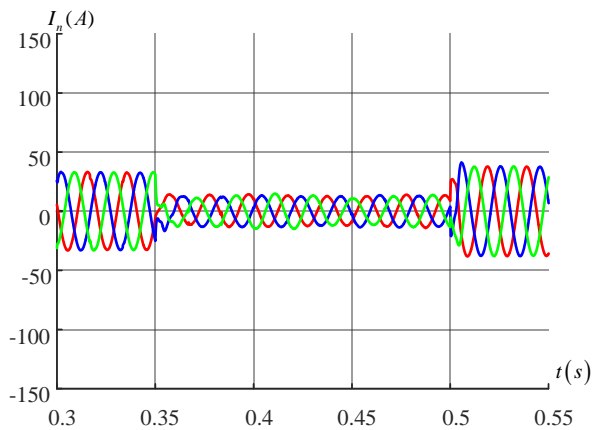


Рис. А7.29 Токи на нагрузке в момент возникновения короткого замыкания

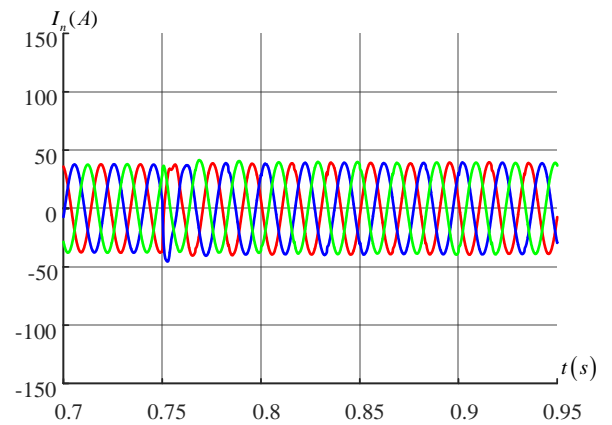


Рис. А7.30 Токи на нагрузке в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

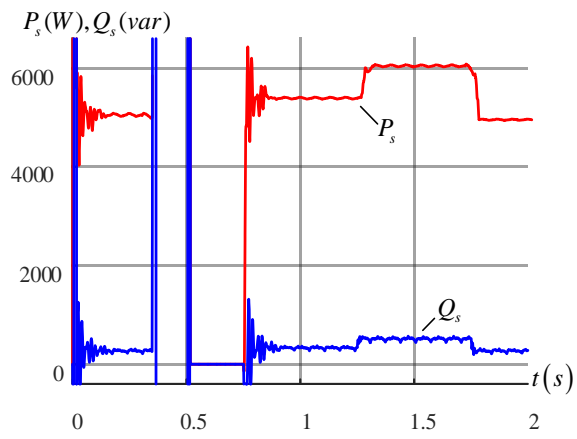


Рис. А7.31 Мощности на передающей системе

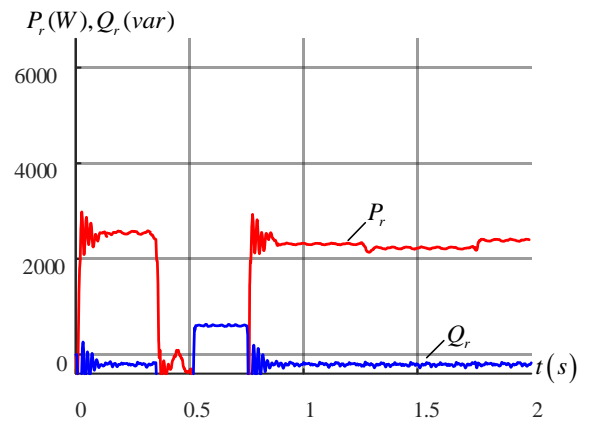


Рис. А7.32 Мощности на приемной системе

Приложение А8. Результаты экспериментов при работе преобразователя частоты по схеме «шестиугольник»

Режим 100% уровня передаваемой мощности при двухканальном режиме работы устройства

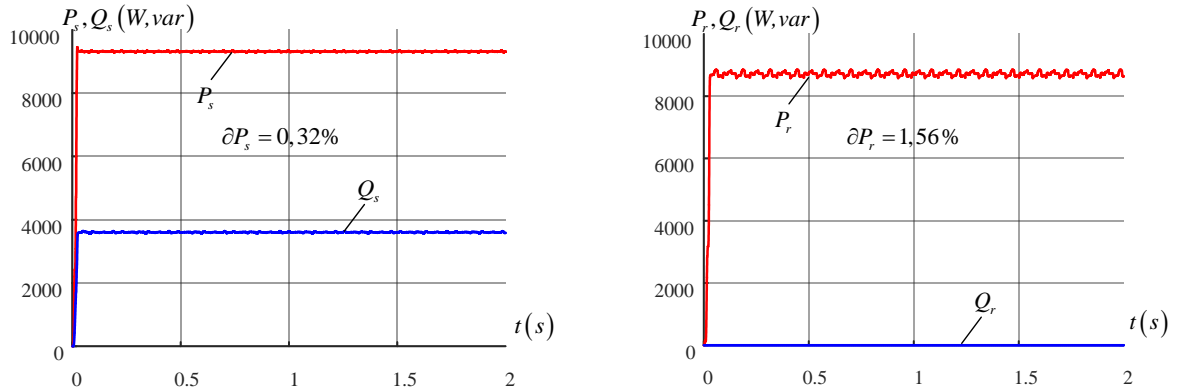


Рис. А8.1 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

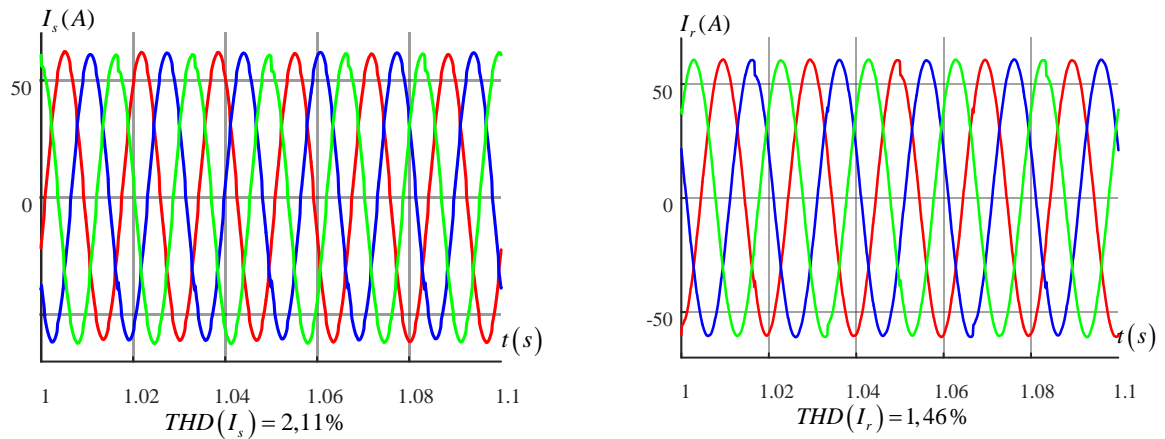


Рис. А8.2 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

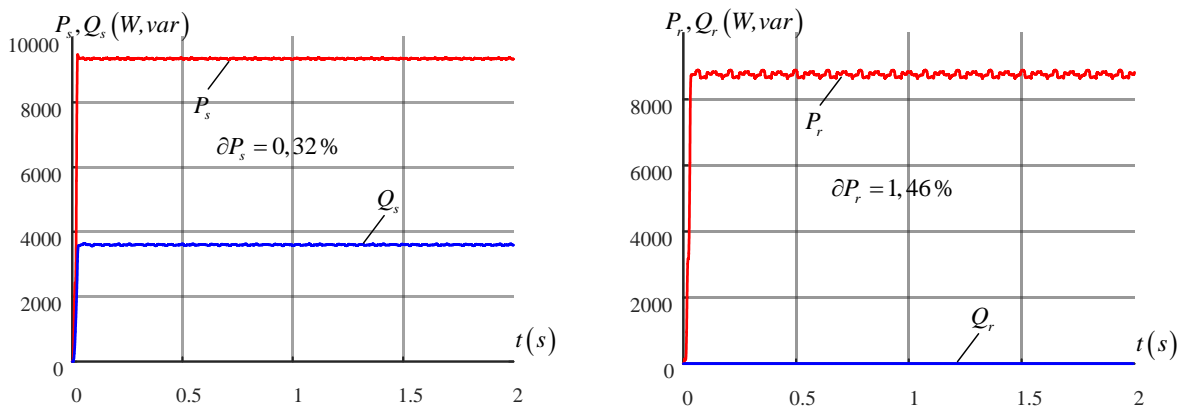


Рис. А8.3 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

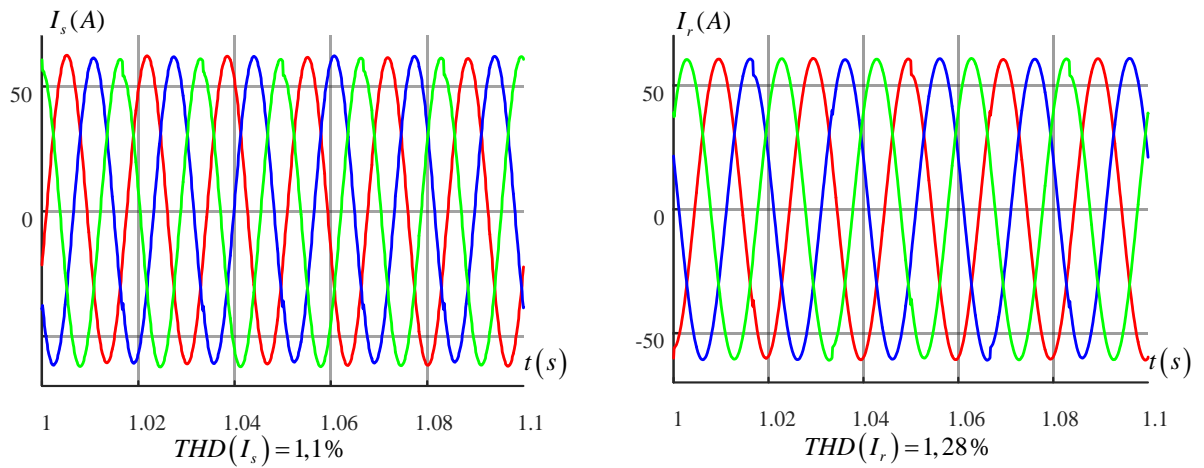


Рис. А8.4 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

Режим 65% уровня передаваемой мощности при двухканальном режиме работы устройства

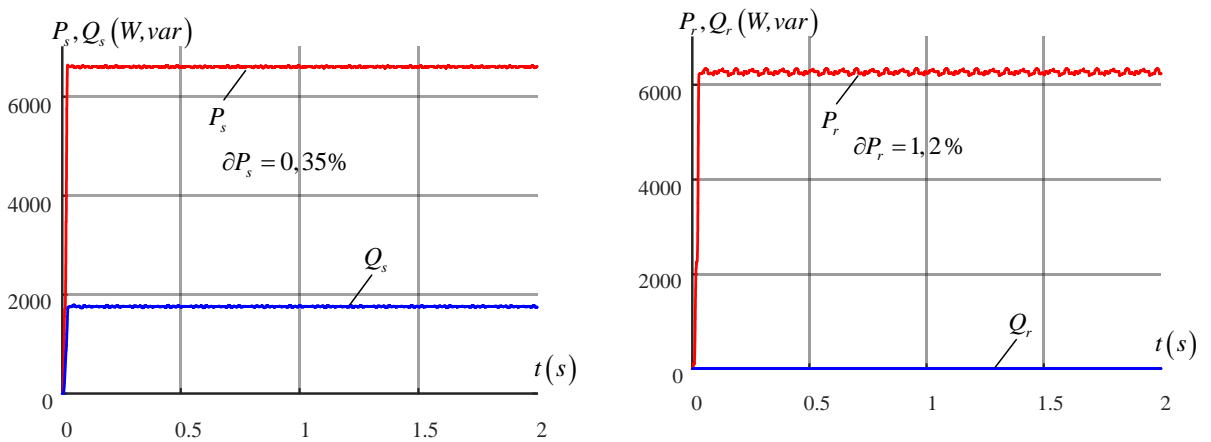


Рис. А8.5 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

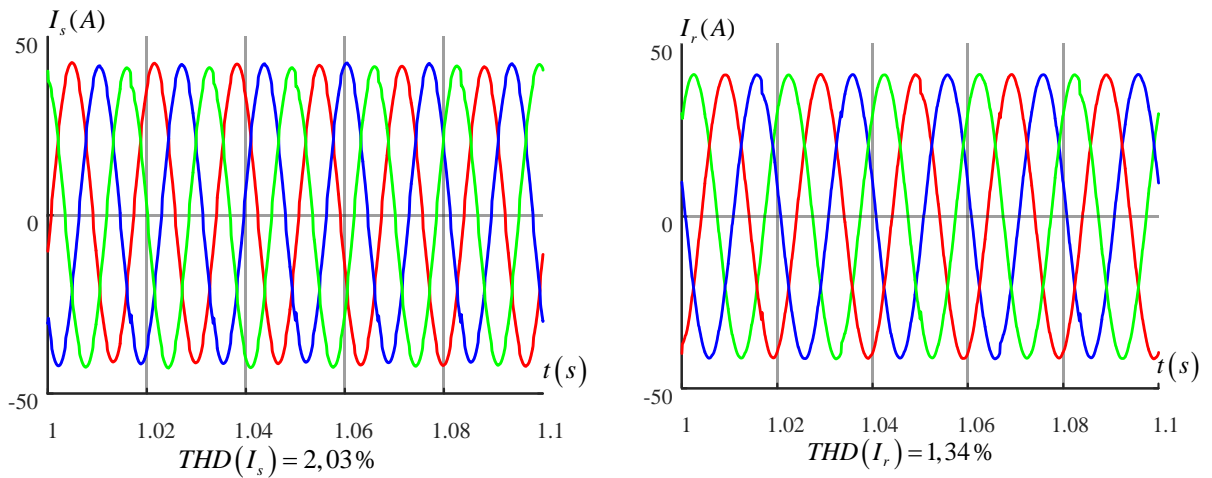


Рис. А8.6 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

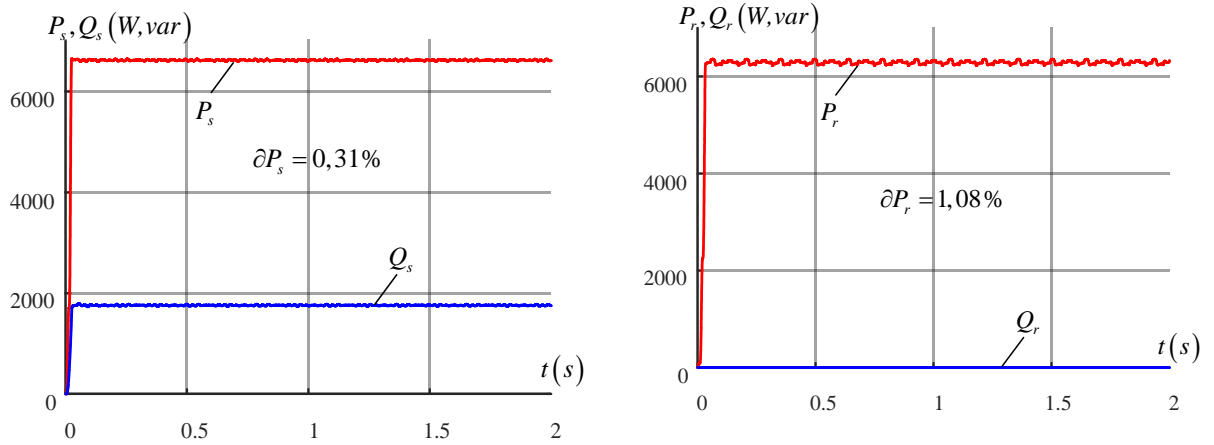


Рис. А8.7 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

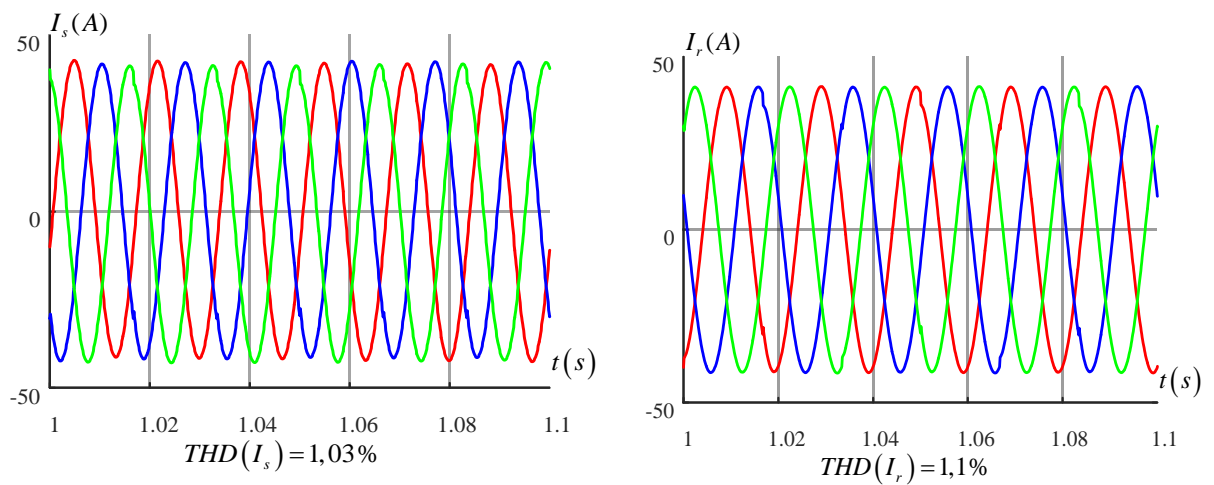


Рис. А8.8 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

Режим 30% уровня передаваемой мощности при двухканальном режиме работы устройства

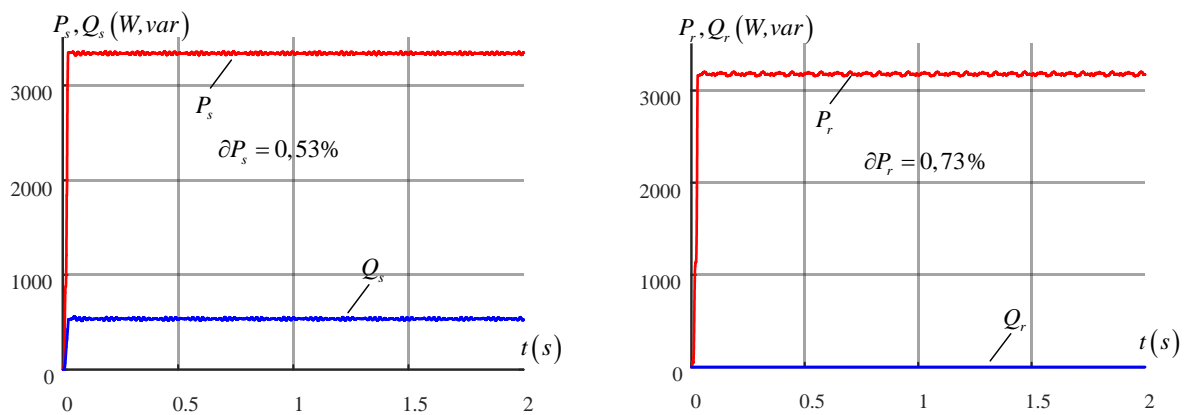


Рис. А8.9 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

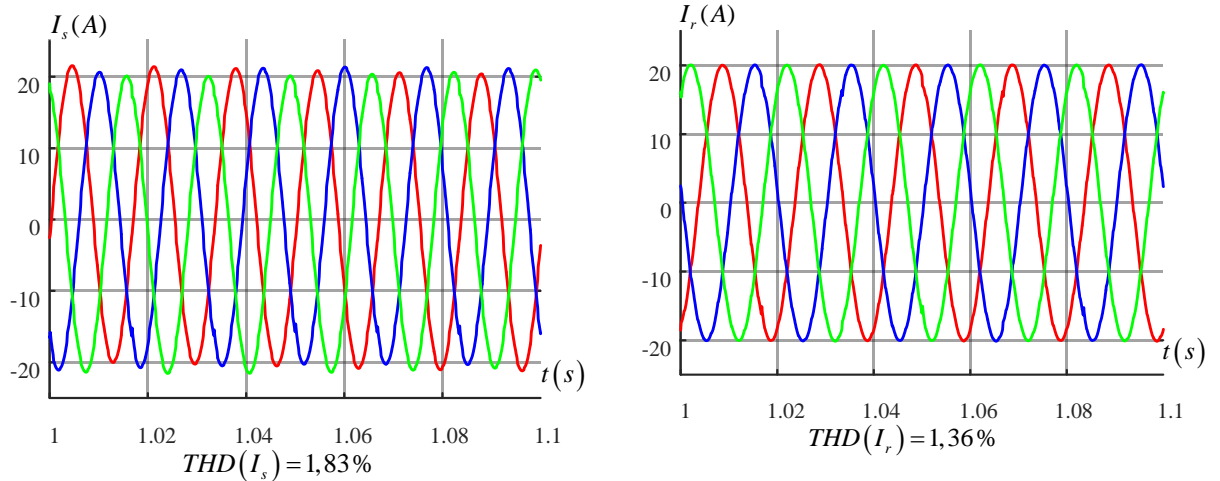


Рис. А8.10 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

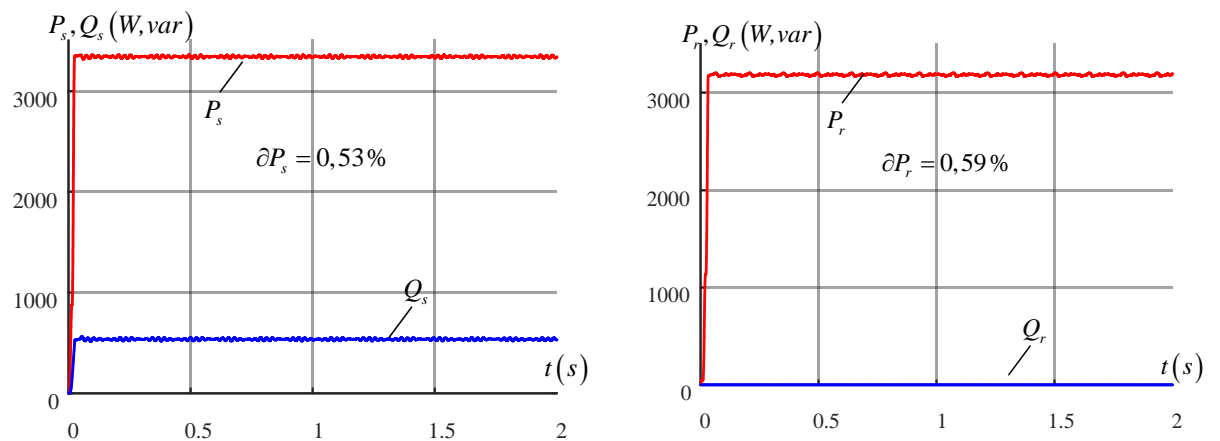


Рис. А8.11 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

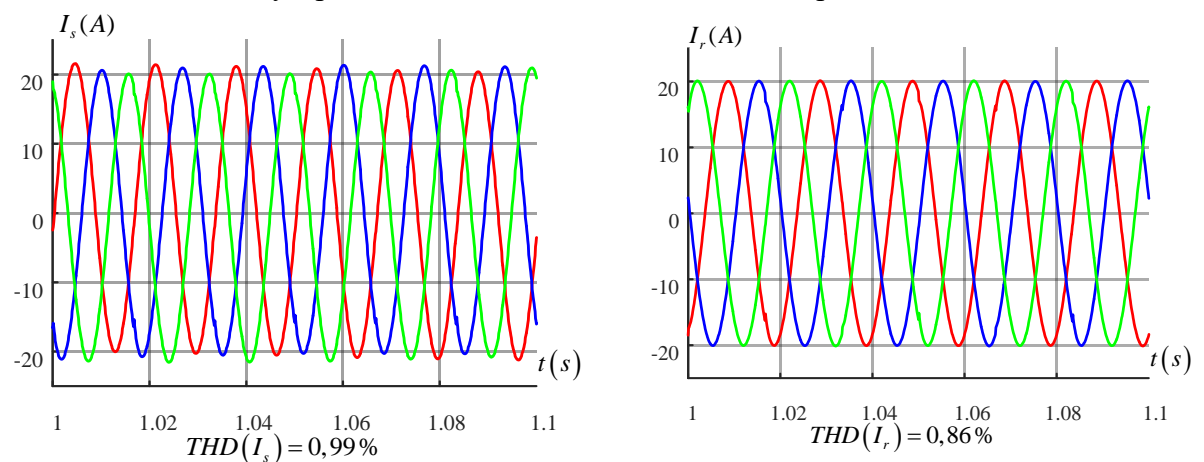


Рис. А8.12 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

Режим 100% уровня передаваемой мощности при четырехканальном режиме работы устройства

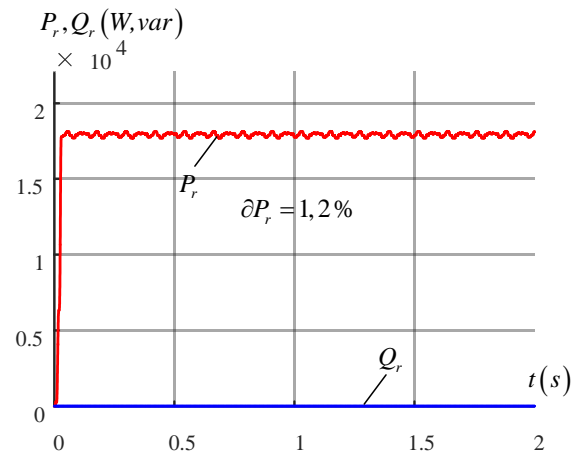
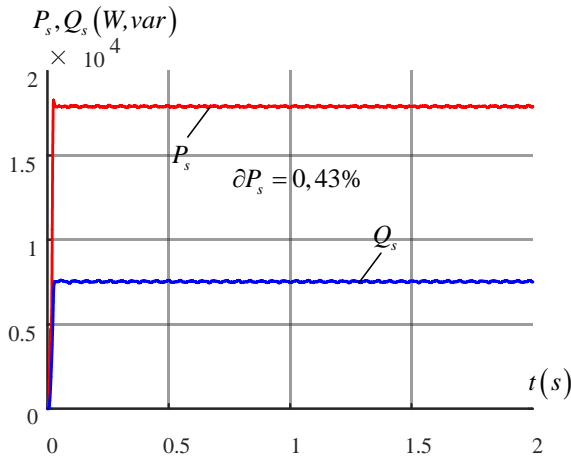


Рис. А8.13 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

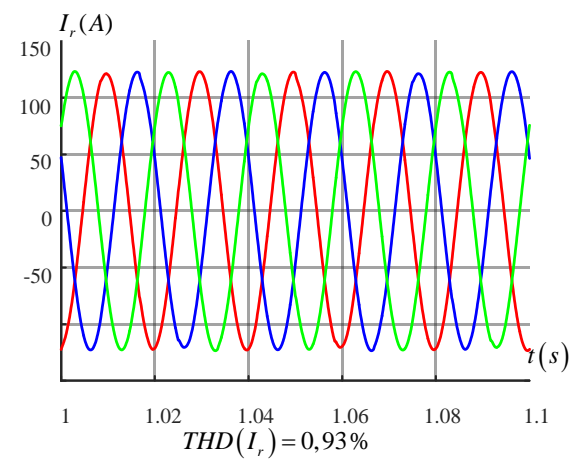
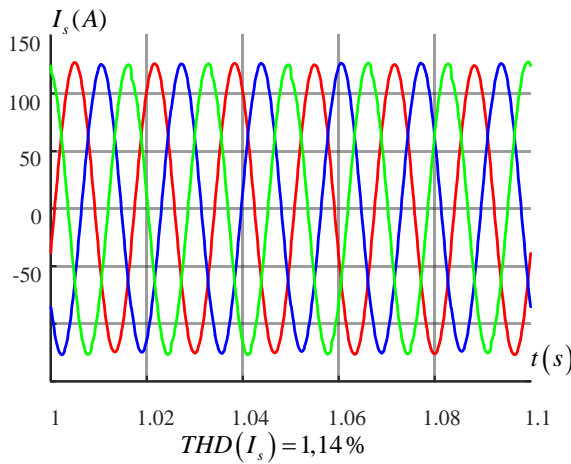


Рис. А8.14 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

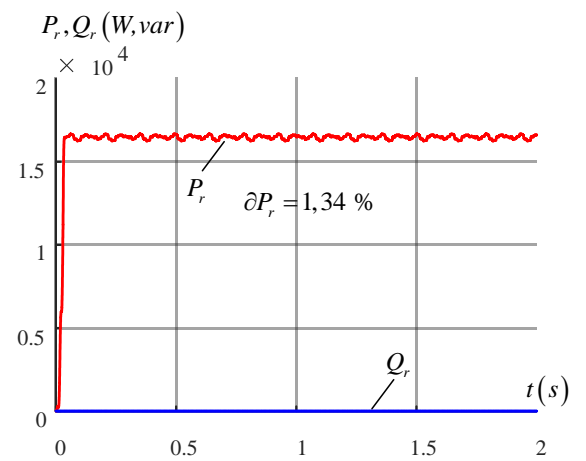
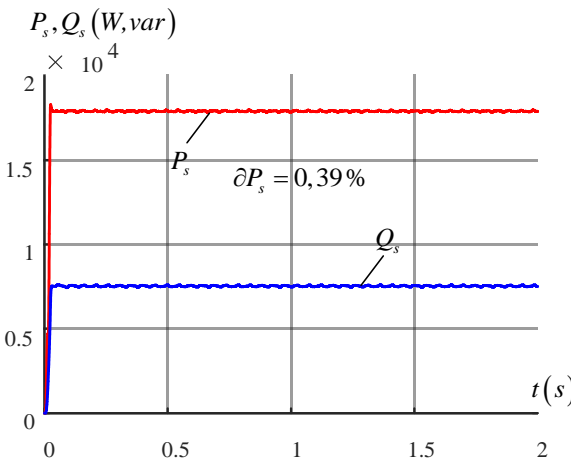


Рис. А8.15 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

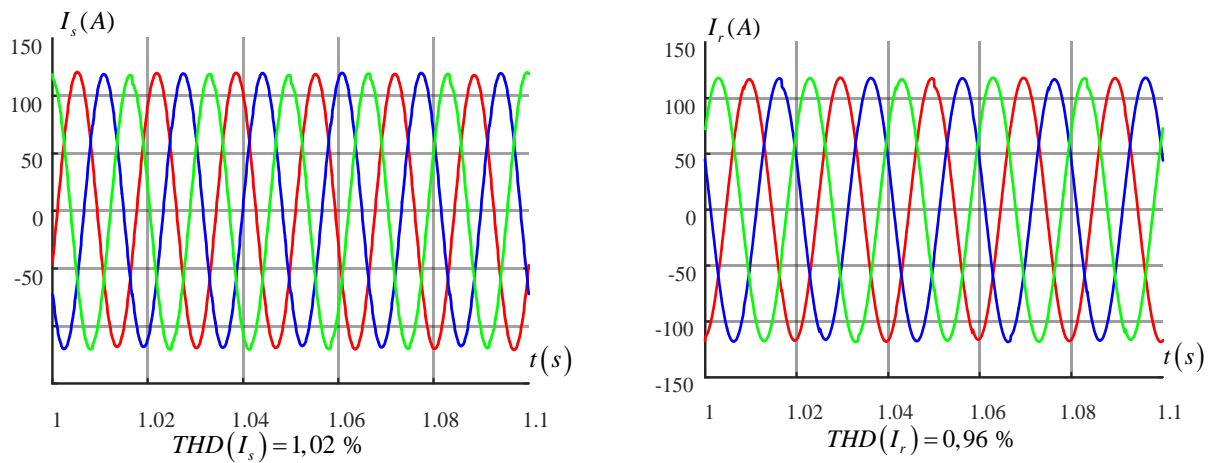


Рис. А8.16 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

Режим 65% уровня передаваемой мощности при четырехканальном режиме работы устройства

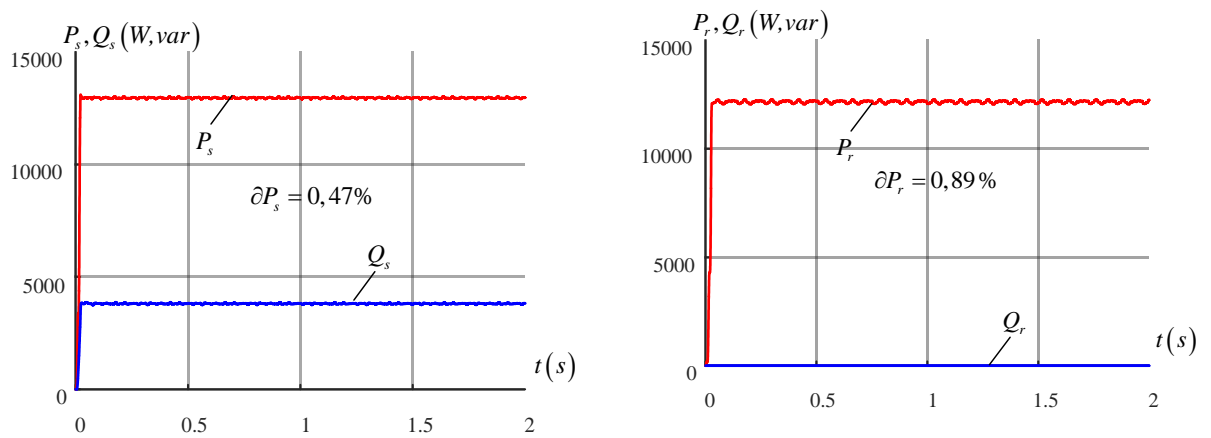


Рис. А8.17 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

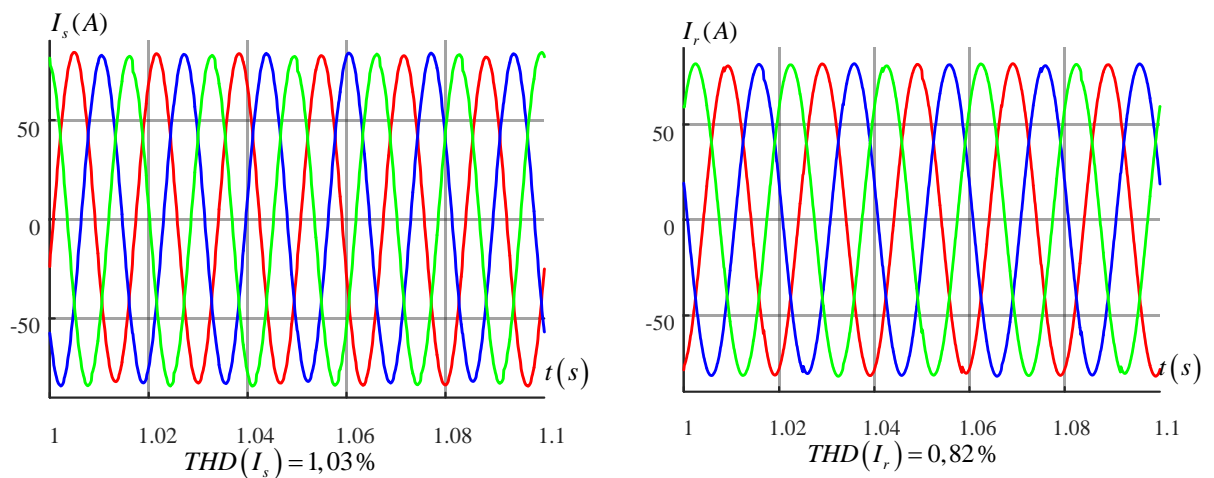


Рис. А8.18 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

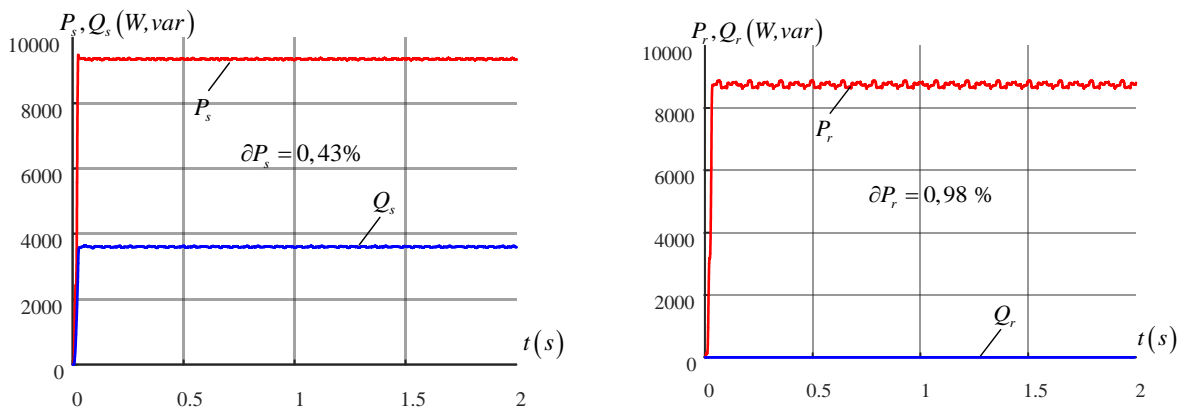


Рис. А8.19 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

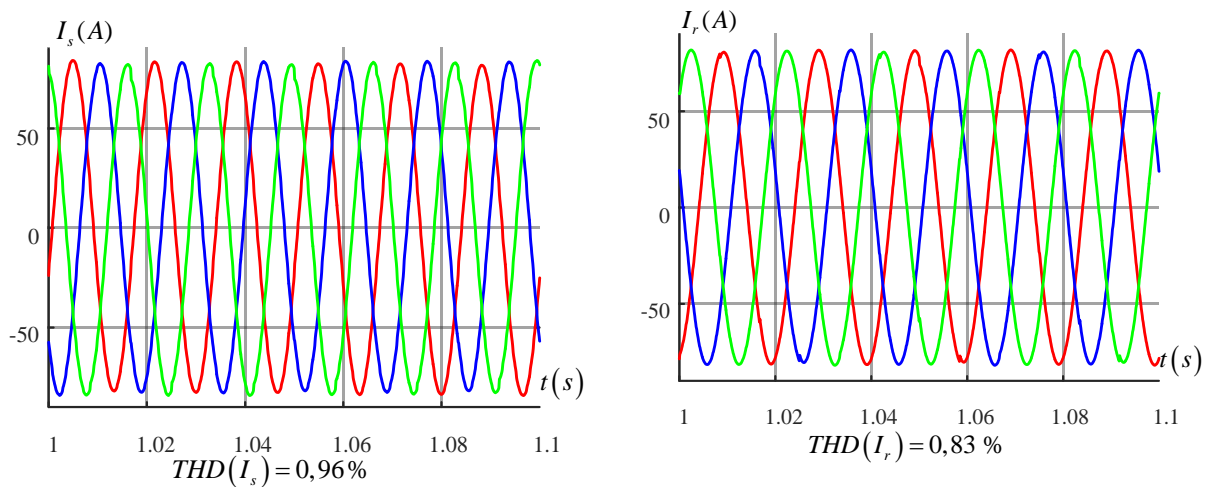


Рис. А8.20 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

Режим 30% уровня передаваемой мощности при четырехканальном режиме работы устройства

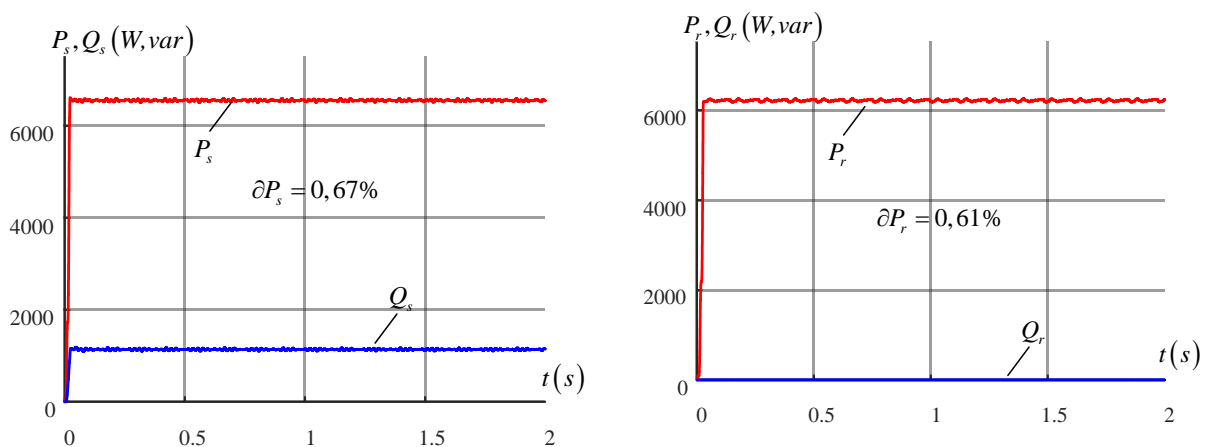


Рис. А8.21 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

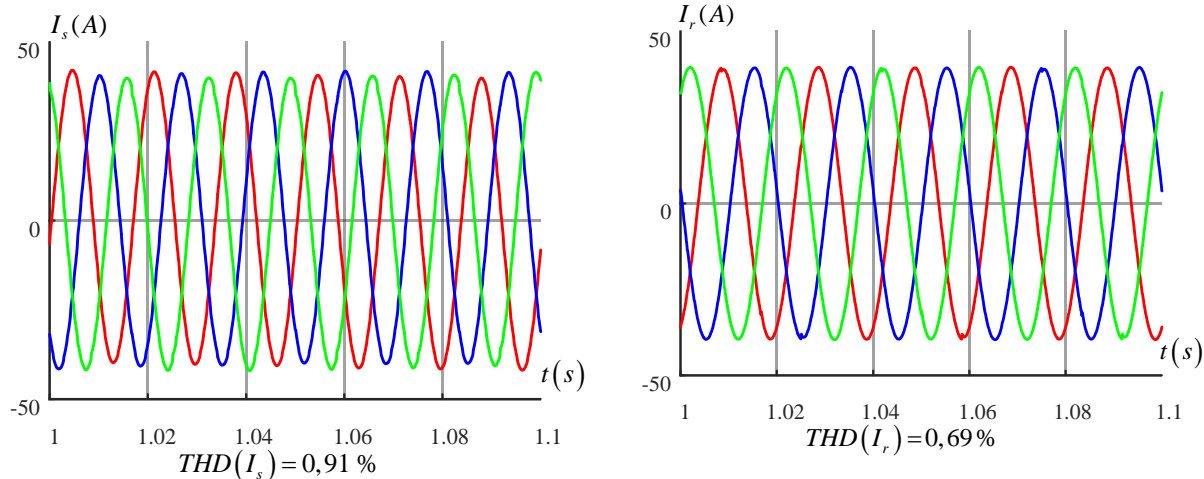


Рис. А8.22 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24 позиционном секционировании

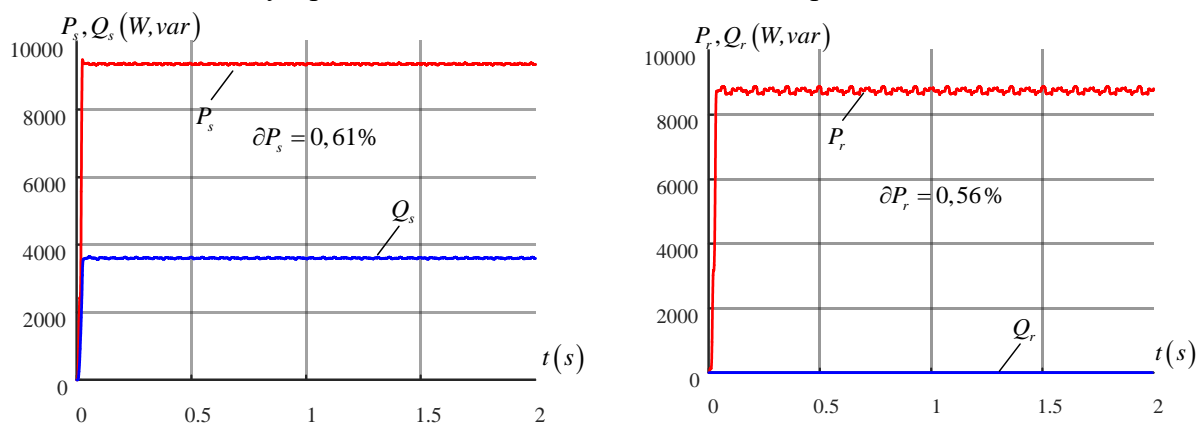


Рис. А8.23 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

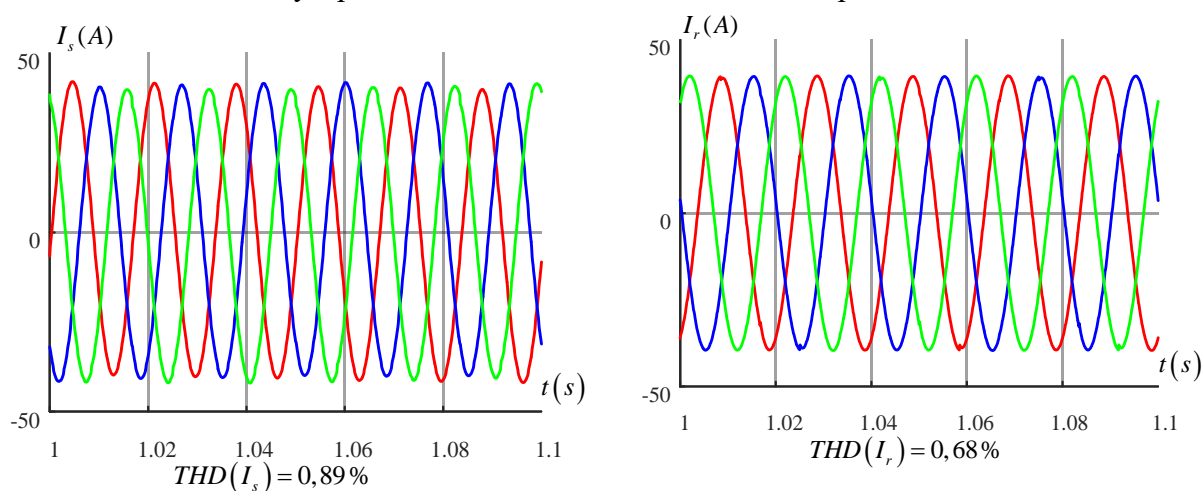


Рис. А8.24 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48 позиционном секционировании

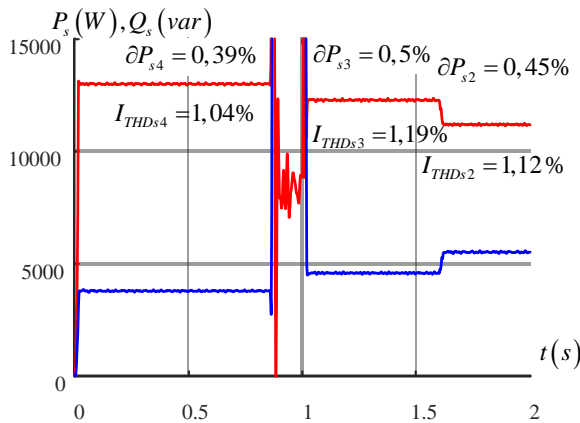


Рис. А8.25 Мощности на передающей системе при загрузке 100% от номинальной мощности устройства

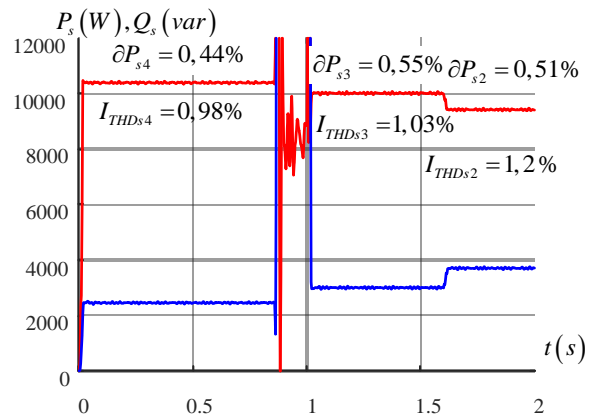


Рис. А8.26 Мощности на передающей системе при загрузке 65% от номинальной мощности устройства

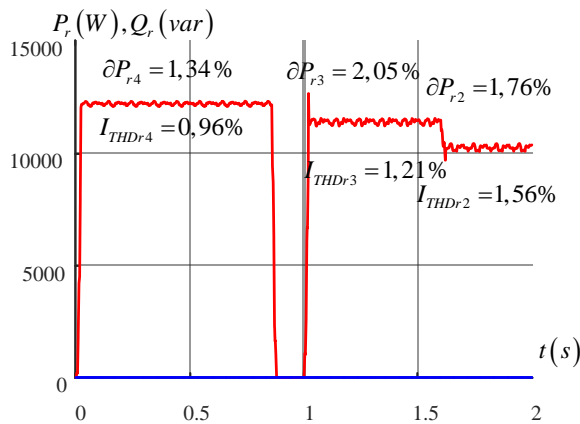


Рис. А8.27 Мощности на приемной системе при загрузке 100% от номинальной мощности устройства

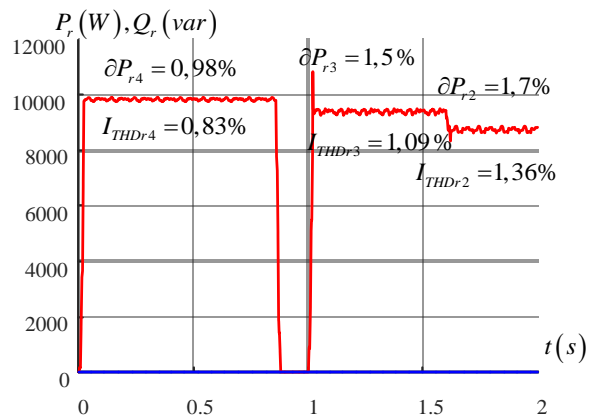


Рис. А8.28 Мощности на приемной системе при загрузке 65% от номинальной мощности устройства

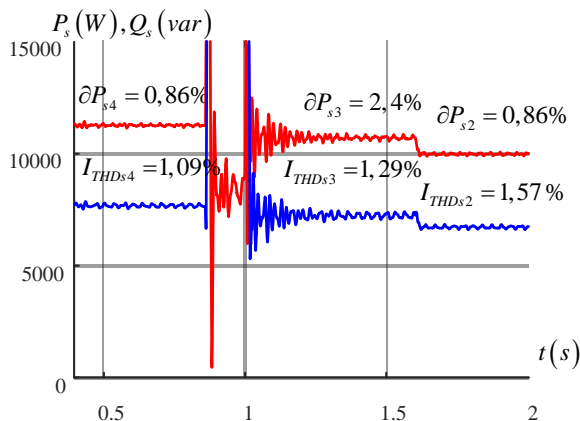


Рис. А8.29 Мощности на передающей системе при загрузке 100% от номинальной мощности устройства

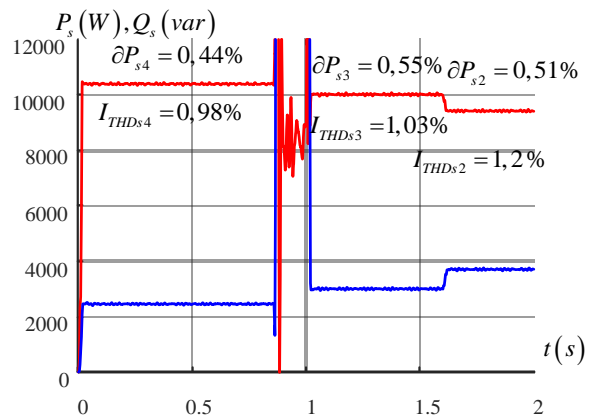


Рис. А8.30 Мощности на передающей системе при загрузке 65% от номинальной мощности устройства

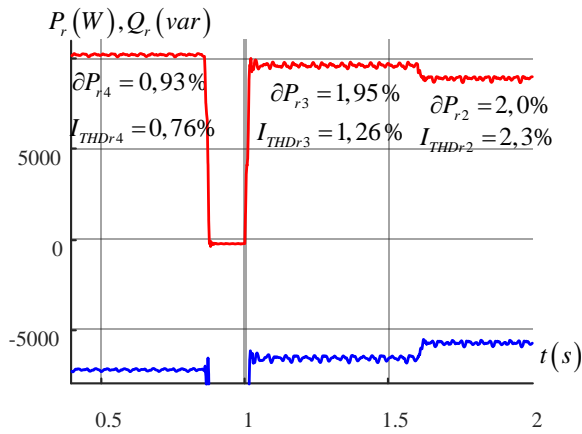


Рис. А8.31 Мощности на приемной системе при загрузке 100% от номинальной мощности устройства

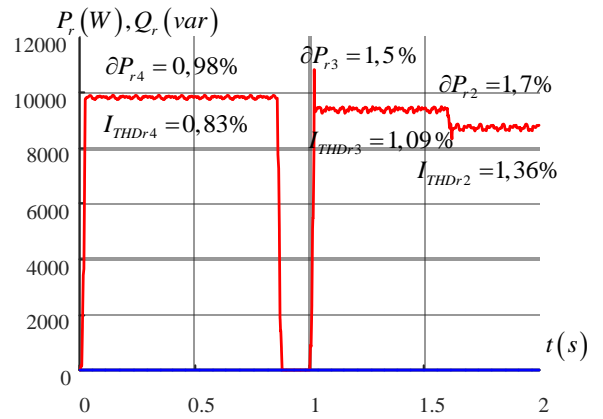


Рис. А8.32 Мощности на приемной системе при загрузке 65% от номинальной мощности устройства

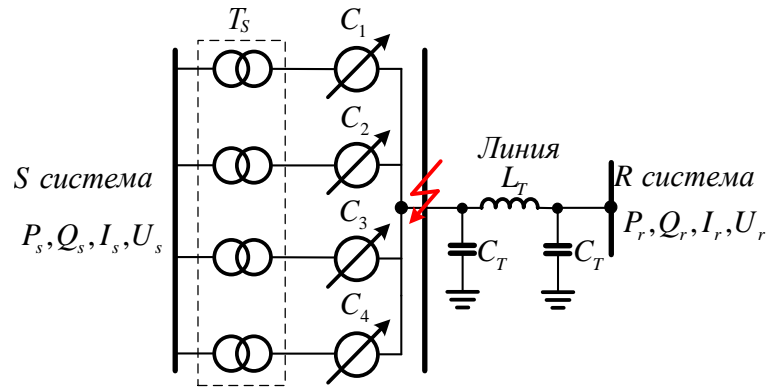


Рис. А8.33 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах приемной системы

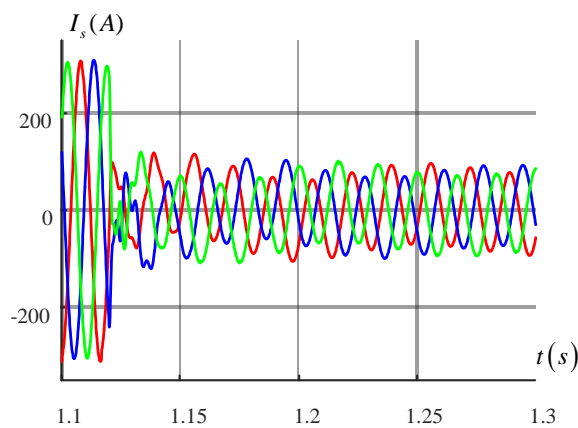


Рис. А8.34 Ток на передающей системе в момент отключения короткого замыкания

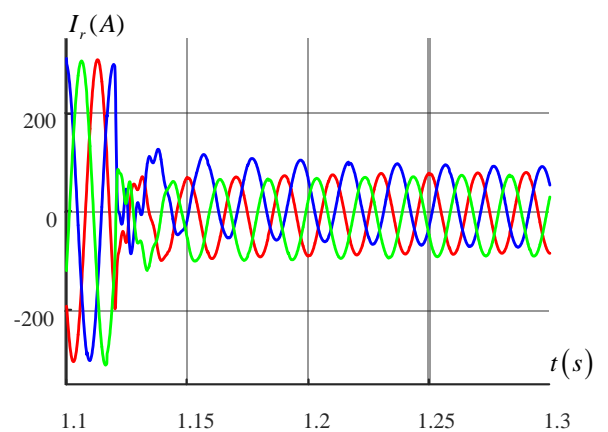


Рис. А8.35 Ток на приемной системе в момент отключения короткого замыкания

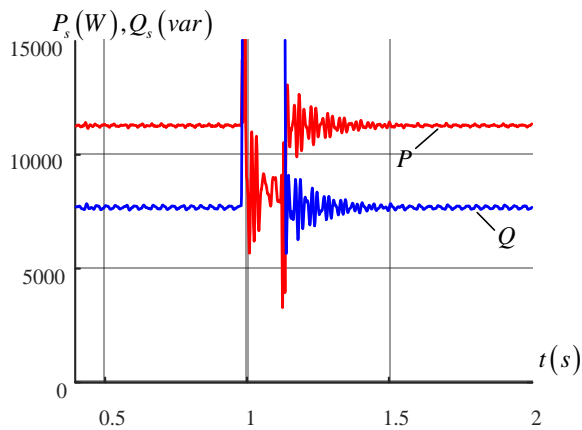


Рис. А8.36 Мощности на передающей системе

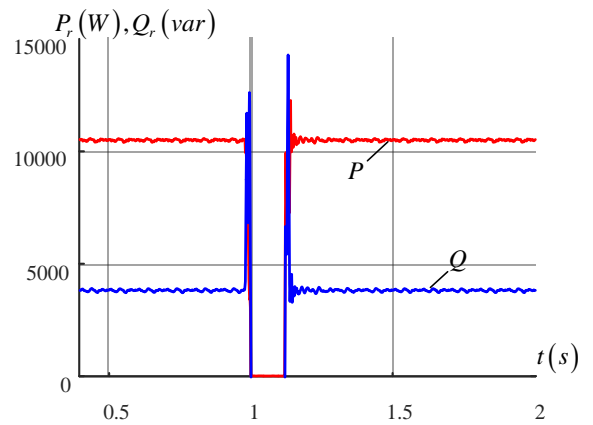


Рис. А8.37 Мощности на приемной системе

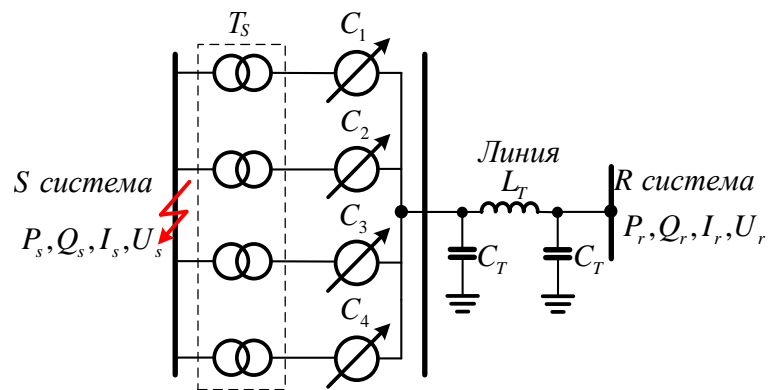


Рис. А8.38 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах приемной системы

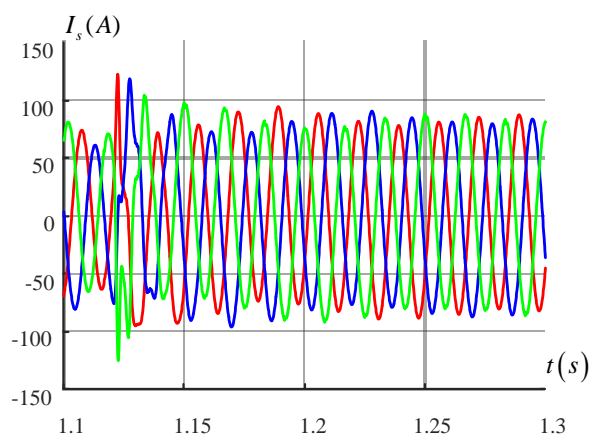


Рис. А8.39 Ток на передающей системе в момент отключения короткого замыкания

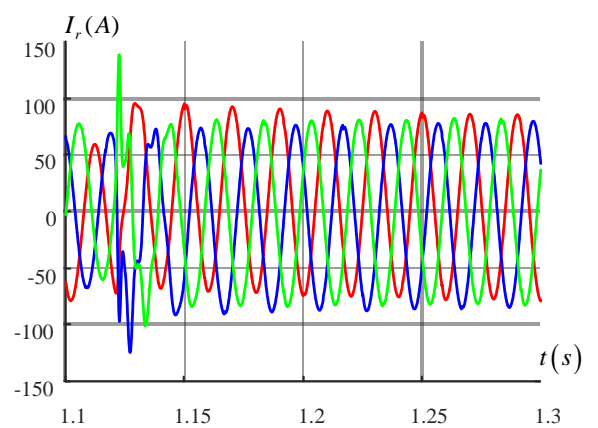


Рис. А8.40 Ток на приемной системе в момент отключения короткого замыкания

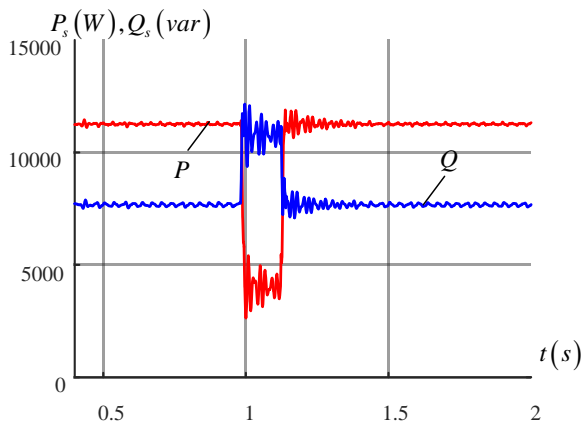


Рис. А8.41 Мощности на передающей системе

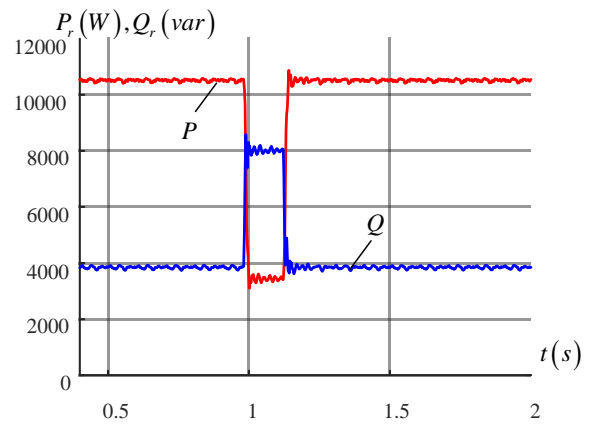


Рис. А8.42 Мощности на приемной системе

ОБ АВТОРЕ

- Фамилия, имя:** Калошин Данила
- Дата и место рождения:** 16.11.1982, п. Идрица Себежский р-н Псковская об., Россия
- Гражданство:** Республика Молдова
- Образование:** Высшее:
- 2000-2005 ПГУ им. Т.Г. Шевченко Инженерно – технический институт, Тирасполь, специальность "Электроснабжение промышленных предприятий";
 - 2019 аспирантура, Технический Университет Республики Молдова, Кишинёв.
- Профессиональная деятельность:** 03/2008–2013 Инженер службы режимов ГУП «ГП Днестр-энерго»
09/2013– 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:** 7th International Conference of Modern Power Systems, MPS 2017, Cluj-Napoca, June 06-09, 2017
8th International Conference on Energetics and Ecological Environment, CIEM 2017, Bucharest, October 19-20, 2017
WEC CENTRAL & EASTERN EUROPE ENERGY FORUM – FOREN 2020, En-ergy Transition in South East Europe: Opportunities, Challenges, Perspectives Costineşti, Romania, 7-10 September 2020
- Научные и научно-методические работы:** Опубликовано 9 научных статей
- Контактная информация**
- E-mail:** d.n.kaloshin@gmail.com
- Тел.** +373 604 504 16