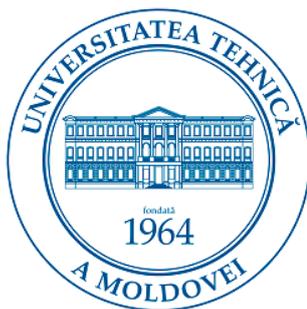


**ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ МОЛДОВЫ**



На правах рукописи

У.Д.К.: 621.314.26(043)

**КАЛОШИН ДАНИЛА**

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

**221.01 – ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Кишинев, 2021**

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

**Научный руководитель:**

**Постолатий Виталий** доктор технических наук, академик ИЭ  
**Тыршу Михаил** кандидат технических наук, доцент ИЭ

**Официальные оппоненты:**

**Амброс Тудор** доктор технических наук, профессор ТУМ  
**Зайцев Дмитрий** кандидат технических наук, доцент ИЭ  
**Попеску Виктор** кандидат технических наук, доцент АУМ

**Состав специализированного ученого совета:**

**Киорсак Михаил** доктор технических наук, профессор ТУМ – председатель  
**Гуцу-Четрушка Корина** кандидат технических наук ТУМ, секретарь  
**Стратан Ион** кандидат технических наук, профессор ТУМ

Защита состоится 9 сентября 2021, в 10<sup>00</sup> на заседании Докторской Комиссии в докторальной школе „Компьютерные науки, электроника и энергетика” Техническом Университете Молдовы (утверждено решением Докторской Комиссии (ДК) 221.01 от 09.06.2021 № 01): MD-2012, Республика Молдова, г. Кишинев, ул. 31 Августа 1989, № 78, учебный блок № 2, каб. 2-211.

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

Автореферат был разослан июня 2021.

**Ученый секретарь  
Докторальной Комиссии,**  
кандидат технических наук,

**Гуцу-Четрушка Корина**

**Научный руководитель:**

академик,  
доктор технических наук,  
кандидат технических наук,  
доцент,

**Постолатий Виталий**

**Тыршу Михаил**

**Автор:**

**Калошин Данила**

© Калошин Данила, 2021

### **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. На сегодняшний день в Европе уже функционирует единое МГЭО «ENTSO-E», объединяющее более сорока сетевых и системных операторов из 36 европейских стран.

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.

В настоящее время вопрос повышения управляемости электрических сетей за счет применения специальных технических средств является актуальным. Одним из направлений комплексного решения перечисленных проблем является создание и внедрение в энергосистемах управляемых межсистемных связей (УМС).

Таким образом, представляется актуальной разработка предлагаемых статических трансформаторных преобразователей частоты для организации УМС переменного тока, обладающих преимуществами по отношению к существующим типам преобразователей.

### **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 в проведении 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 де-

тального 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. WEC CENTRAL & EASTERN EUROPE ENERGY FORUM – FOREN 2020, Energy Transition in South East Europe: Opportunities, Challenges, Perspectives Costinești, Romania, 7-10 September 2020.

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

**Структура и объём диссертации.** Диссертация изложена на 170 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.

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

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, 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. Ключевые проблемы передачи постоянным током детально изучены на практике и успешно преодолеваются, однако многие конструктивные решения пока остаются дорогостоящими.

Альтернативой передачам постоянного тока являются вращающиеся трансформаторы. В мире существуют опытно – промышленный образец АС ЭМПЧ (Россия) и трансформатор с изменяемой частотой вращения компании «General Electric», получивший название «Variable frequency transformer» (VFT).

На данный момент реализованы три проекта VFT. Первые два проекта были выполнены в одноканальном исполнении мощностью 100 МВт на подстанциях Langlois Hydro – Québec (Канада, 2004год) и Laredo (США штат Техас, 2007 год). Оба проекта направлены на объединение асинхронно работающих энергосистем Мексики и Канады с энергосистемой США. Третий проект Linden является первым многоканальным VFT суммарной мощностью 300 МВт для объединения энергосистем штатов Нью-Джерси и Нью-Йорка (США, 2009 год).

Так же исследована возможность применения VFT для связи энергосистем, частота скольжения которых больше  $\pm 3 Гц$ . Результаты исследований показали принципиальную возможность построения УМС переменного тока при более широком диапазоне изменения частоты скольжения. Однако, при этом устройства такого типа будут обладать чрезмерно сложной системой управления и требовать применения компенсирующих устройств для поддержания требуемого уровня напряжения на шинах, мощность которых будет превышать установленную мощность вращающегося трансформатора в два раза.

**Во второй главе** представлен методологический аппарат исследования и математические модели предлагаемых устройств на основе источника неизменного тока и на основе статического трансформатора.

Представлены применяемые в работе основные общенаучные методы и общелогические приемы, позволяющие решить поставленные задачи и достичь цели исследования. Основополагающими для проведения настоящего исследования приняты методы математического и имитационного моделирования. В качестве инструмента имитационного моделирования в данной работе выступает среда динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем MatLAB – Simulink – SimPowerSystems.

Разработана схема статического преобразователя с шестью парами трехфазных модулей состоящих из двух источников неизменного тока оснащенных четырьмя силовыми ключами (рис. 1) и создана математическая модель устройства.

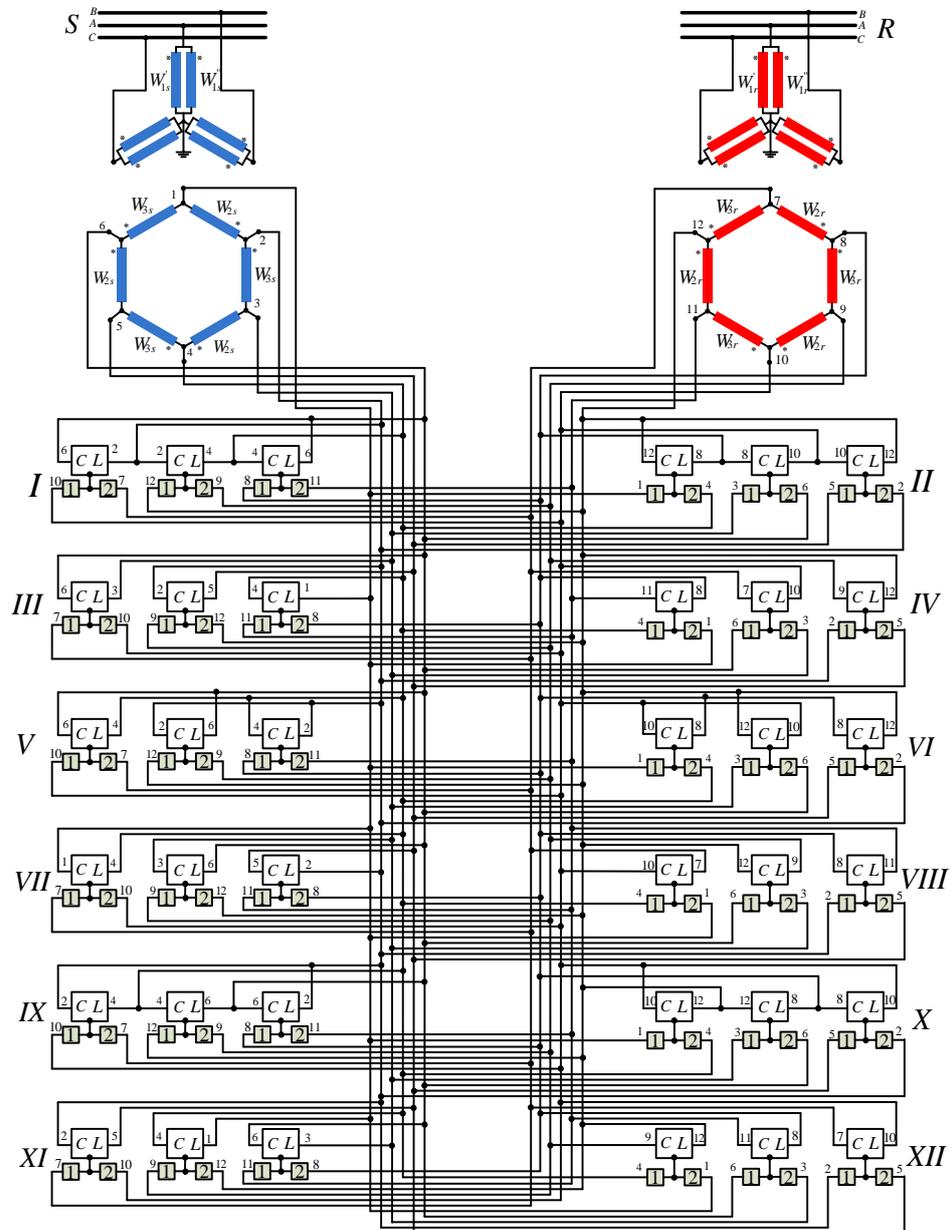


Рис. 1 – Электрическая схема статического преобразователя частоты выполненного на основе источников неизменного тока

На основе закона комбинаторики получены 4 096 неповторяющихся комбинаций включения ключей, позволяющие получить 361 оригинальный уровень передаваемой мощности, представленные на рис. 2, где положительным принято направление передачи мощности передающей энергосистемы (S) к приемной энергосистеме (R).

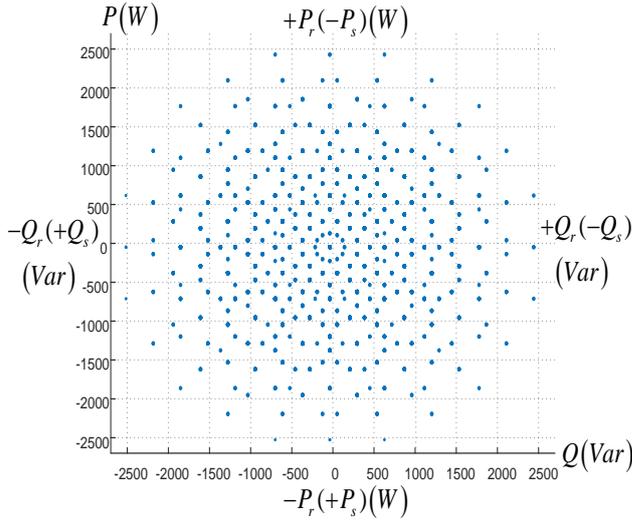


Рис. 2 Комплексная плоскость значений передаваемых мощностей на входе и выходе устройства

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, (таблица 1);  $Q_n^{I,II}, Q_n^{III,IV}, Q_n^{V,VI}, Q_n^{VII,VIII}, Q_n^{IX,X}, Q_n^{XI,XII}$  - мгновенное значение реактивной мощности передаваемой одной парой модулей в зависимости от включенной комбинации ключей на парном модуле, (таблица 2);  $n$  - положение ключей на парных модулях (1-1, 2-2, 1-2, 2-1);  $P_0, Q_0$  - потери активной и реактивной мощности в устройстве.

Таблица 1. Мгновенное значение активной составляющей в зависимости от положения ключей и угла  $\delta_{sr}$ .

№ 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
5	$IX, X$	$P \cdot \left(-\frac{1}{2} \cdot \cos \delta_{sr} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	$P \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \cos \delta_{sr} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	0	0
6	$XI, XII$	$P \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \delta_{sr} + \frac{1}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	$P \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \delta_{sr} - \frac{1}{2} \cdot \sin \delta_{sr}\right)$	0	0

Величина и направление передаваемой активной и реактивной мощности устройством в зависимости от комбинации включения ключей на парных модулях и угла  $\delta_{sr}$  между передающей (S) и принимающей (R) системами определяются по следующим формулам:

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

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

где:  $m$  - номер комбинации включения ключей на парных модулях устройства,

Таблица 2. Мгновенное значение реактивной составляющей в зависимости от положения ключей и угла  $\delta_{sr}$ .

№ 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

Анализ полученных данных позволил выявить цикл из 71 уникального варианта значений передаваемой активной и реактивной мощности в соответствии с предложенной стратегией управления в процессе частотного согласования. На рис. 3 приведен режим максимального уровня передачи активной составляющей мощности в процессе организации УМС двух синхронно работающих энергосистем с разными стандартами по поддержанию частоты.

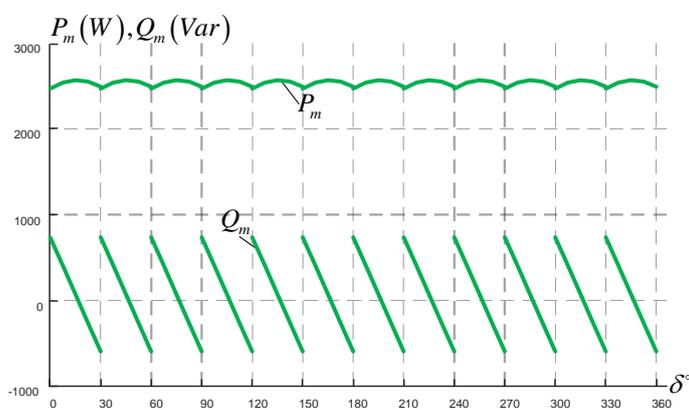


Рис. 3 Сумма расчетных значений мощностей модулей при статическом состоянии устройства

Далее математически обоснована возможность реализации принципа кругового вращения фазы на статическом трансформаторном устройстве.

Рассматриваемое трансформаторное устройство имеет одну трехфазную систему первичных обмоток и две трехфазные системы вторичных обмоток (рис. 4). Первичные обмотки соединены в звезду. Одна система вторичных обмоток соединена в треугольник, к вершинам которого подключены соответствующие фазы вторичных обмоток другой системы. При этом каждая фаза системы выходных напряжений синтезируется путем геометрического суммирования напряжений соответствующих фаз вторичных обмоток (рис. 5).

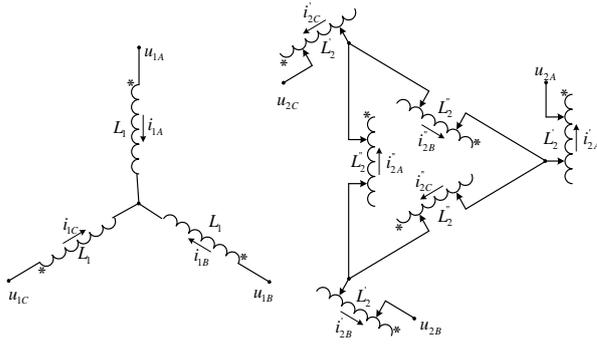


Рис. 4 Схема рассматриваемого варианта устройства

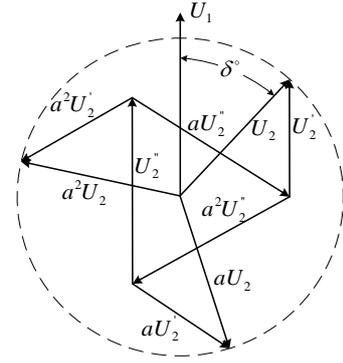


Рис. 5 Векторная диаграмма напряжений устройства

Для рассматриваемого варианта устройства была записана система уравнений равновесия ЭДС для первичных обмоток:

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

После преобразования данной системы уравнений с учетом ряда допущений были получены выражения, характеризующие мгновенные значения выходных напряжений фаз  $u_{2A}, u_{2B}, u_{2C}$ :

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

где:  $k$  - коэффициент электромагнитной связи обмоток;  $\omega_1, \omega_2$  - циклическая частота передающей и приемной системы;  $L_1, L_2$  - собственные индуктивности первичных и вторичных обмоток.

Полученные выражения содержат частотные характеристики передающей и принимающей системы, что доказывает реализуемость принципа кругового вращения фазы выходного напряжения относительно входного на основе статического трансформаторного устройства.

**В третьей главе** выполнено исследование статического преобразователя частоты на основе источников неизменного тока.

В процессе исследования подтверждено, что структурно - имитационная и математическая модель в равной степени иллюстрируют режимные характеристики устройства и его элементов (рис. 6), на примере максимального режима.

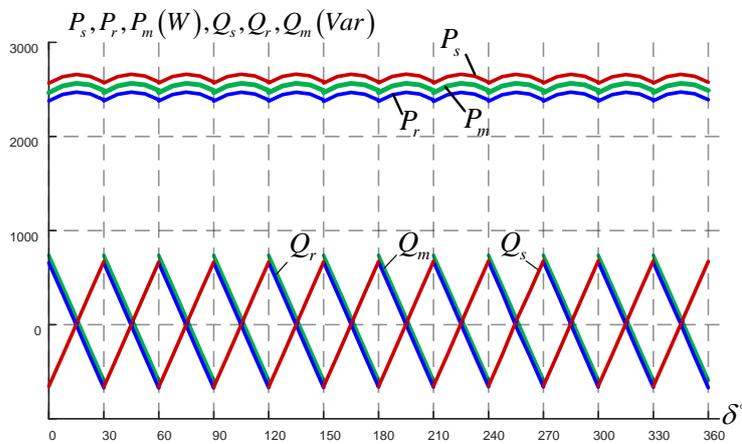


Рис. 6 Значения активных и реактивных мощностей на входе и выходе устройства в условиях статического состояния устройства

Для улучшения качества процесса преобразования была произведена модернизация устройства посредством добавления вторичных обмоток в схему трансформатора со стороны приемной системы, позволяющих осуществить сдвиг по фазе на угол  $15^\circ$  на выводах каждой пары обмоток, отходящих от вершин шестиугольника (рис. 7). В части закона управления устройством было принято решение применить асимметричное управление, заключающееся в поочередной работе модулей.

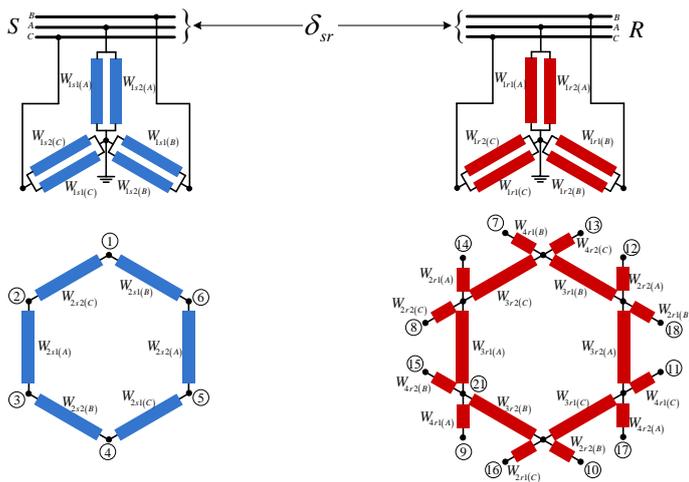


Рис.7 Электрическая схема трансформаторной части преобразователя с установленными дополнительными обмотками

При организации УМС по схеме (рис.7) значение коэффициента гармонических искажений по току было не менее 16%, что является неприемлемым.

Анализ графика представленного на рис. 6 показал, что в момент срабатывания силовых ключей в режиме согласования частоты происходит коммутация значительной сопровождающей реактивной мощности, что негативно сказывается на качестве преобразования. Для улучшения качества процесса преобразования была произведена модернизация

Предложенное техническое решение позволило снизить сопровождающую реактивную мощность в процессе работы преобразователя в два раза (рис. 8). Асимметричное управление позволило увеличить количество режимов работы по передаче мощности устройством в 6,5 раз, с 361 до 2 403 (рис. 9). При организации УМС по схеме (рис.7) значение коэффициента гармонических

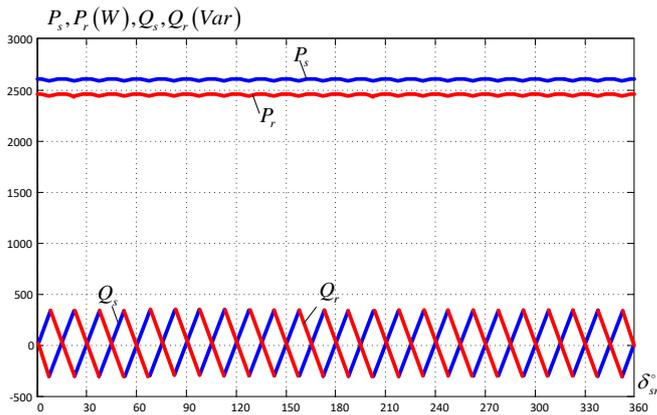


Рис. 8 Статические характеристики мощности преобразователя

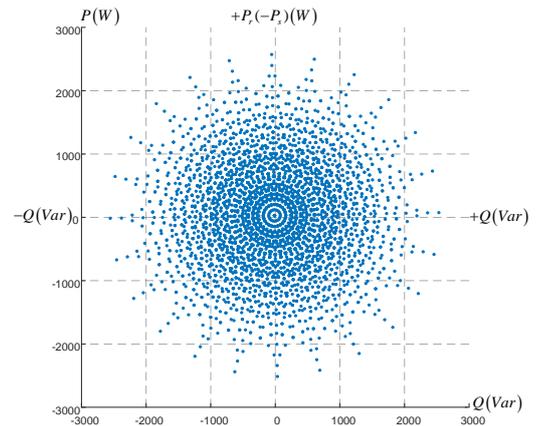


Рис. 9 Область возможных значений передаваемых мощностей

Результаты расчетных экспериментов показали, что в моменты коммутации происходят значительные броски по току при смене характера реактивной мощности с емкостной составляющей на индуктивную и обратно. С целью ограничения бросков тока было

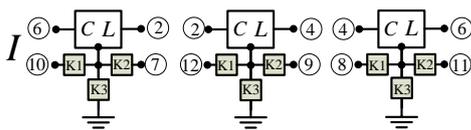


Рис. 10 Принципиальная схема элементарного модуля  $I$  с ключом  $K3$

принято решение дополнить схему устройства дополнительным ключом  $K3$  (рис.10–11). Ключ  $K3$ , кроме обеспечения защиты от явлений резонанса токов, способствует улучшению качества преобразования в виде эффективного средства подавления субсинхронных колебаний (offset) (рис. 12). Такая модернизация устройства расширила область существования режимов с 2 403 до 341 097 оригинальных уровней передаваемой мощности

(рис. 13). Так же модернизация позволила добиться снижения коэффициента гармонических искажений по току, за счет определения оптимального времени срабатывания ключа  $K3$  ( $8^\circ$  или  $\tau = 0,111111$  сек.), с 19,6% до 7,02% на передающей системе и с 16,07% до 8,31% на приемной системе (рис. 14), что соответствует требованиям стандарта IEEE-519.

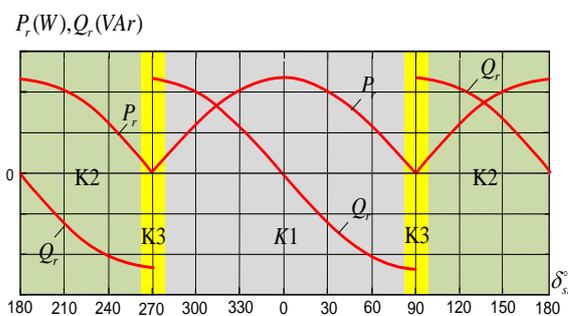


Рис. 11 Изменение активной и реактивной мощности одного модуля

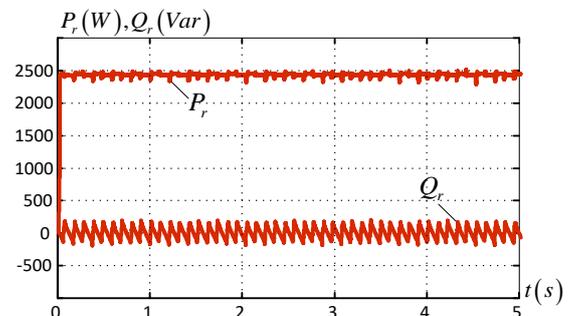


Рис. 12 Работа преобразователя с ключом  $K3$

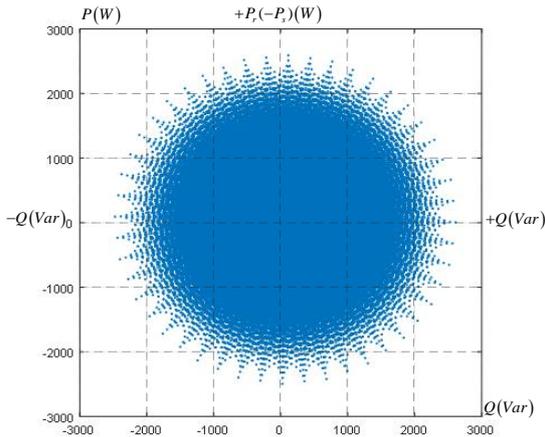


Рис. 13 Область возможных значений передаваемых мощностей при включении ключа КЗ

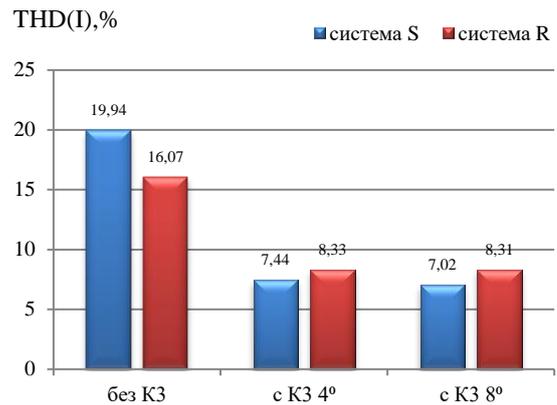


Рис. 14 Гистограмма коэффициентов гармонических искажений тока при разном времени включения ключа КЗ

Результаты моделирования доказывают, что организация УМС на основе принятого технического решения позволяет: обеспечить стабильную передачу активной мощности, существенно снизить броски реактивной мощности, улучшить показатели коэффициента гармонических искажений тока, снизить амплитуду субсинхронных колебаний (рис. 12, 14).

Для дальнейшего улучшения параметров УМС были применены гармонические фильтры и демпферы, что позволило снизить коэффициент гармонических искажений по току на передающей системе с 7,02% до 4%, а на приемной системе с 8,31% до 5,07%.

Результаты исследования доказали, что математическая модель устройства может быть применена для определения и анализа характеристик устройств такого типа. Статический преобразователь на основе источников неизменного тока обеспечивает управление параметрами режима в широком диапазоне. Разработанные законы управления элементарными модулями позволяют обеспечить УМС переменного тока систем с разными стандартами частоты.

**В четвертой главе** разработана и исследована УМС на базе преобразователя выполненного по схеме «зигзаг» (рис.15). Предложенный вариант преобразователя позволяет осуществлять круговое вращение вектора выходного напряжения относительно входного.

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

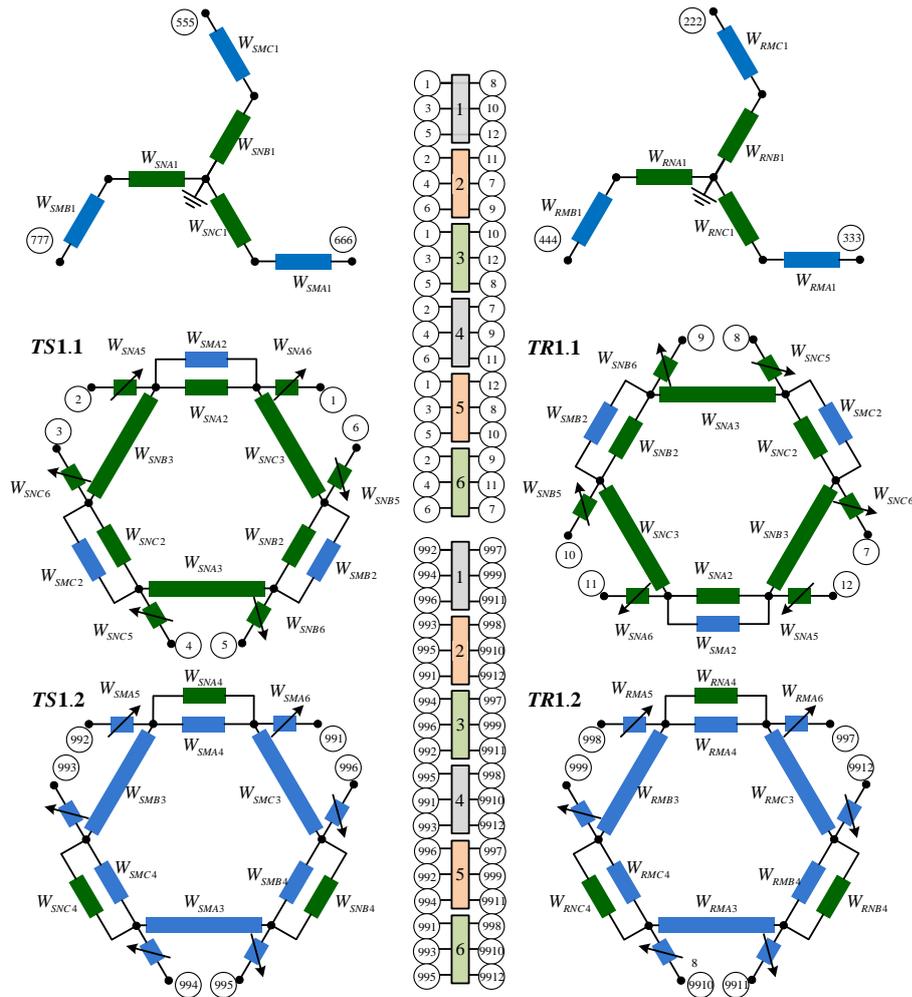


Рис.15 Схема двухканального статического преобразователя частоты по схеме «зигзаг».

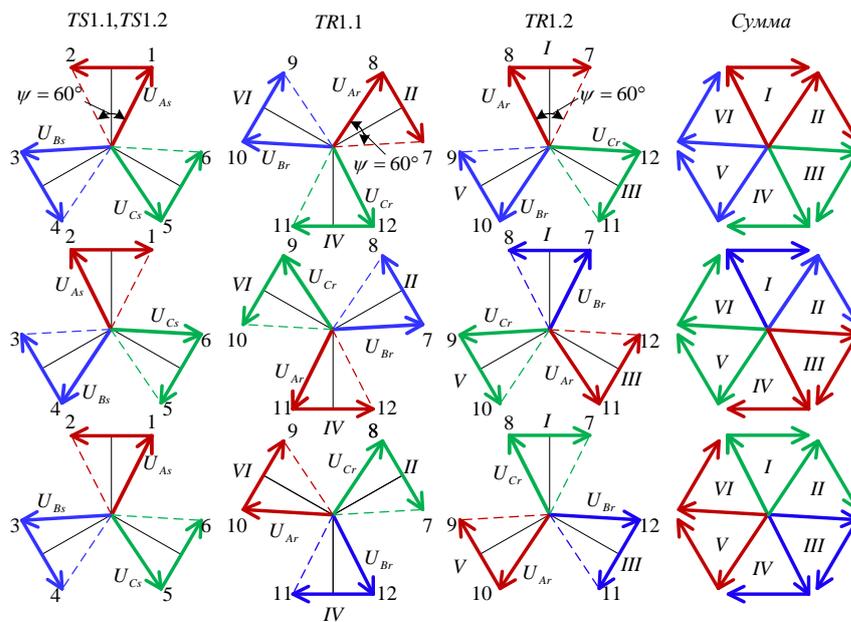


Рис. 16 Векторная диаграмма, поясняющая реализацию закона «грубого» управления

«зигзаг» с целью подавления 3 гармоники тока. Нерегулируемые вторичные обмотки трансформаторов, соединены по схеме «шестиугольник», к вершинам которых подключены соответствующие обмотки управления, представляющие собой блок «тонкого» регулирования, в диапазоне  $60^\circ$  град. Ключи 1-6 пред-



приемную систему через линию (рис. 21-22) при двух вариантах секционирования обмотки «тонкого» регулирования и разных соотношениях частот (рис. 23-24) и мощностей передающей и приемной систем (рис. 25-26).

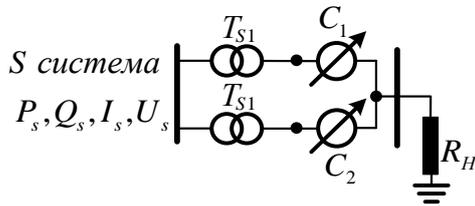


Рис. 21 Схема работы преобразователя на активную нагрузку

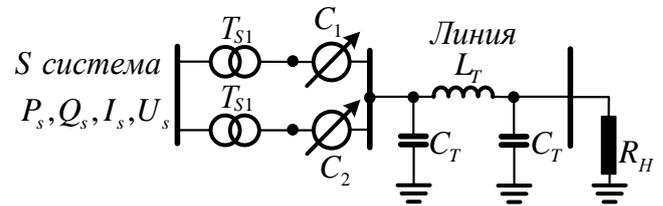


Рис. 22 Схема работы преобразователя на активную нагрузку через ЛЭП 30°

Для оценки качества преобразования частоты и передачи мощности, применялись следующие режимные параметры: степень стабильности передаваемой активной мощности  $\delta P, \%$  и коэффициент гармонических искажений тока  $THD(I), \%$ . Результаты, представленные на рис. 23-24, обозначенные буквой «а» иллюстрируют степень стабильности передаваемой активной мощности, буквой «б» - коэффициент гармонического искажения токов. Индекс «L» обозначает питание нагрузки через линию без индекса питание нагрузки с шин устройства.

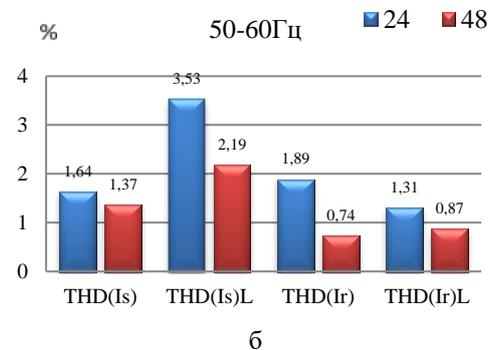
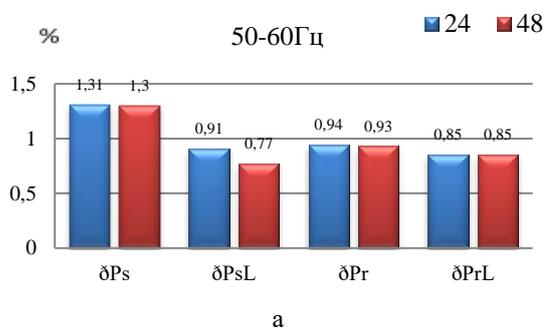


Рис. 23 Гистограммы режимных параметров, определяющих качество преобразования при работе устройства на активную нагрузку и соотношении частот 50-60 Гц.

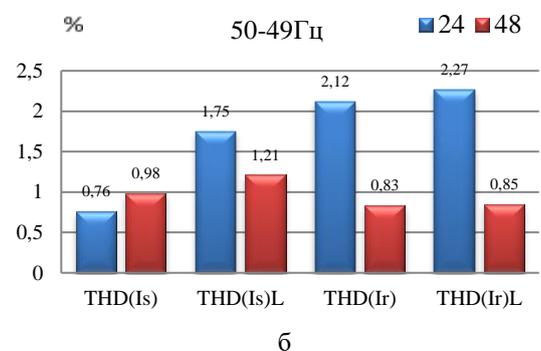
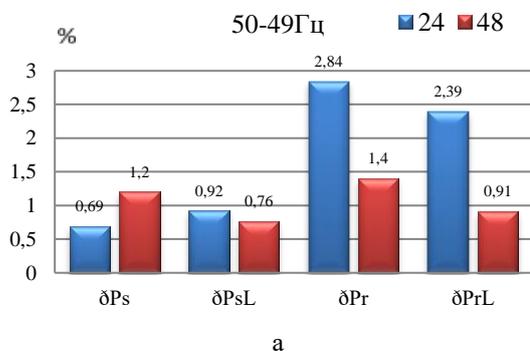


Рис. 24 Гистограммы режимных параметров, определяющих качество преобразования при работе устройства на активную нагрузку и соотношении частот 50-49 Гц.

Представленные гистограммы подтверждают целесообразность применения 48 позиционного секционирования при организации УМС переменного тока асинхронно работающих систем с частотой скольжения  $\pm 10 \text{ Гц}$ .

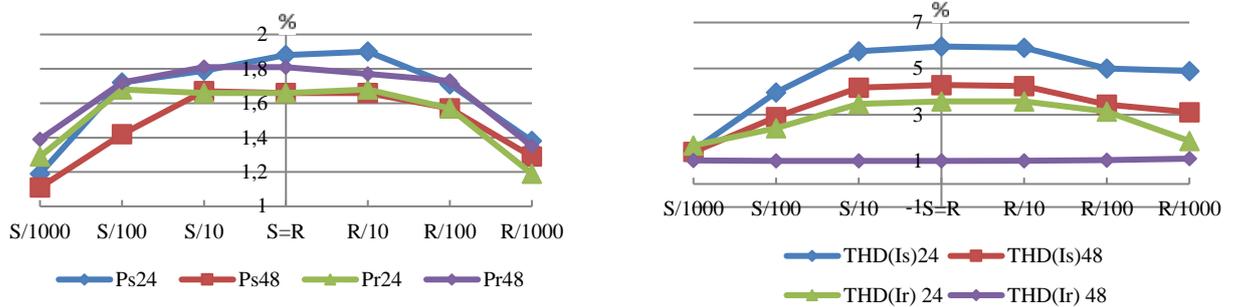


Рис. 25 Графики режимных параметров, в зависимости от соотношения мощностей передающей S (50 Гц) и принимающей R (60 Гц) систем.

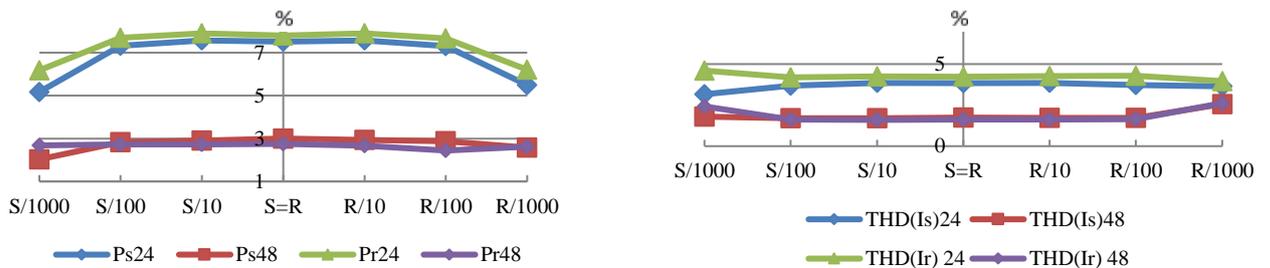


Рис. 26 Графики режимных параметров, в зависимости от соотношения мощностей передающей S (50 Гц) и принимающей R (49,6 Гц) систем.

Характеристики, представленные на рис. 25 – 26, свидетельствуют об эффективности применения преобразователя с 48 позиционным секционированием при подключении к энергосистеме небольших источников с нестабильной рабочей частотой.

Далее были исследованы характерные режимы работы УМС с преобразователем при набросе и сбросе нагрузки (рис. 27), а так же при возникновении трехфазного короткого замыкания на шинах приемной системы (рис. 28).

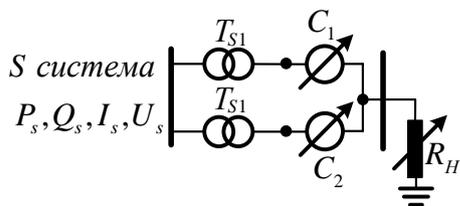


Рис. 27 Схема проведения эксперимента при набросе и сбросе нагрузки

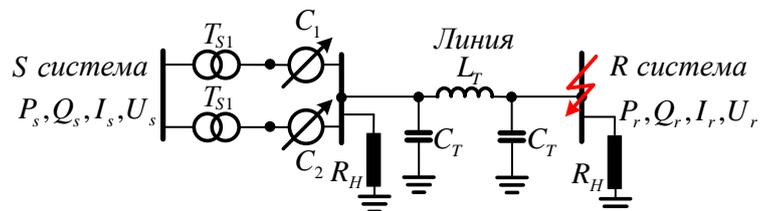


Рис. 28 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах приемной системы

Осциллограммы мощностей и токов: при набросе и сбросе нагрузки приведены на рис. 29-32, при возникновении трехфазного короткого замыкания на шинах приемной системы на рис. 33-36.

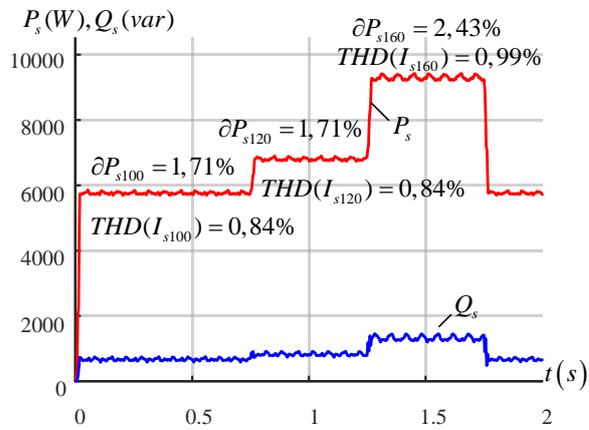


Рис. 29 Мощности на передающей системе в момент наброса и сброса нагрузки

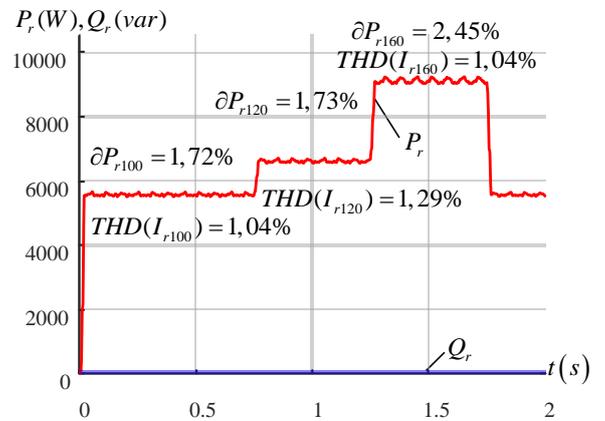


Рис. 30 Мощности на приемной системе в момент наброса и сброса нагрузки

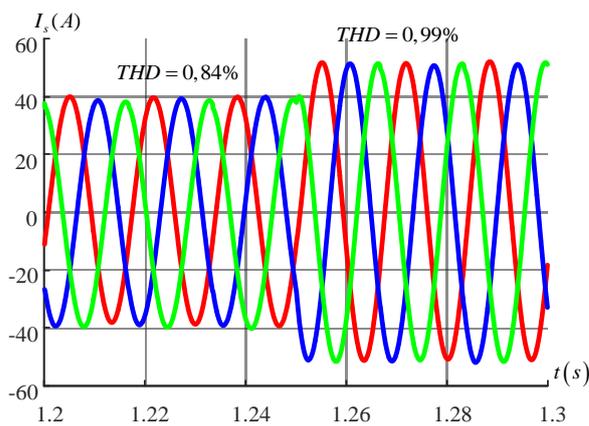


Рис. 31 Ток на передающей системе в момент наброса нагрузки

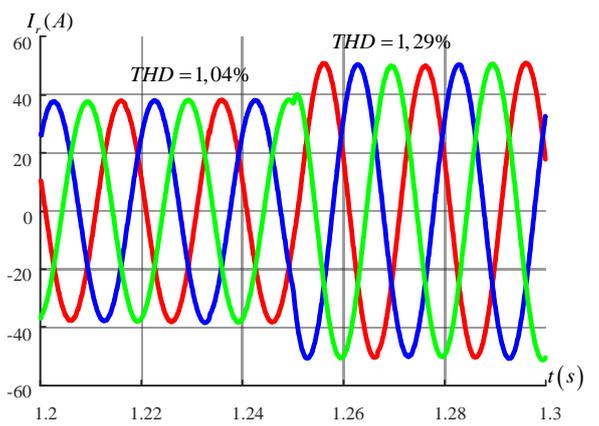


Рис. 32 Ток на приемной системе в момент наброса нагрузки

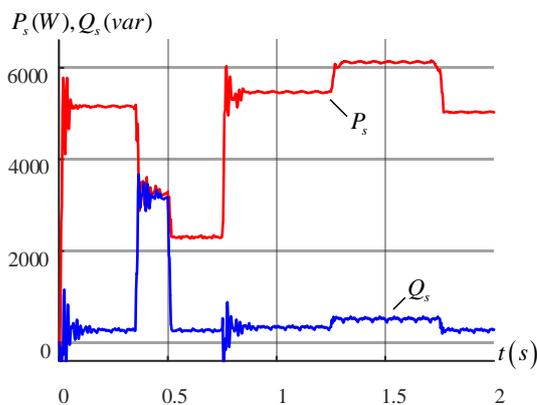


Рис. 33 Мощности на передающей системе

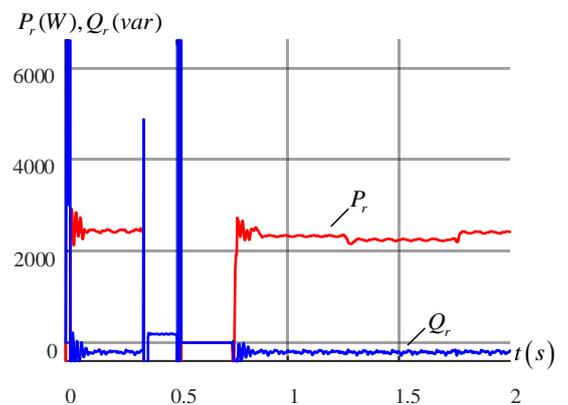


Рис. 34 Мощности на приемной системе

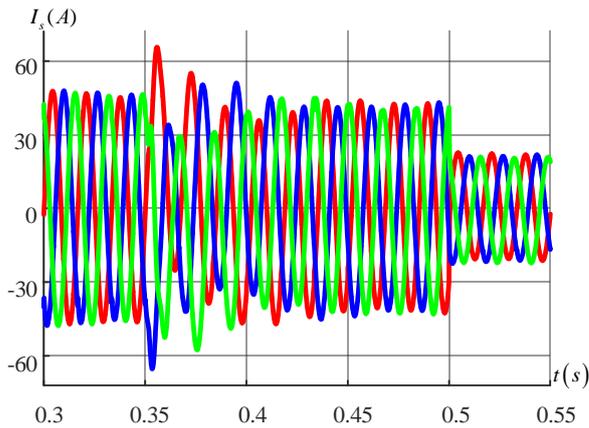


Рис. 35 Ток на передающей системе в момент возникновения и отключения КЗ

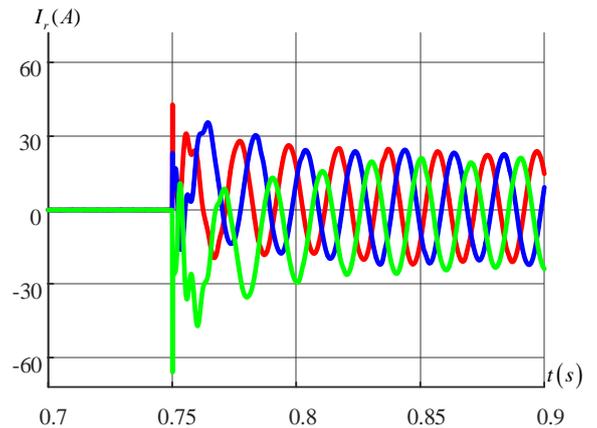


Рис. 36 Ток на приемной системе в момент восстановления УМС

Результаты исследования характерных режимов УМС показали техническую эффективность предлагаемого схемного варианта устройства с точки зрения реакции преобразователя частоты на исследуемые типы возмущений.

Проведенный анализ указывает на целесообразность построения УМС на основе преобразователя частоты с дискретностью «тонкого» регулирования  $2,5^\circ$ .

**В пятой главе** разработана и исследована УМС на базе преобразователя, выполненного по схеме «шестиугольник», принципиальная схема которого представлена на рис. 37.

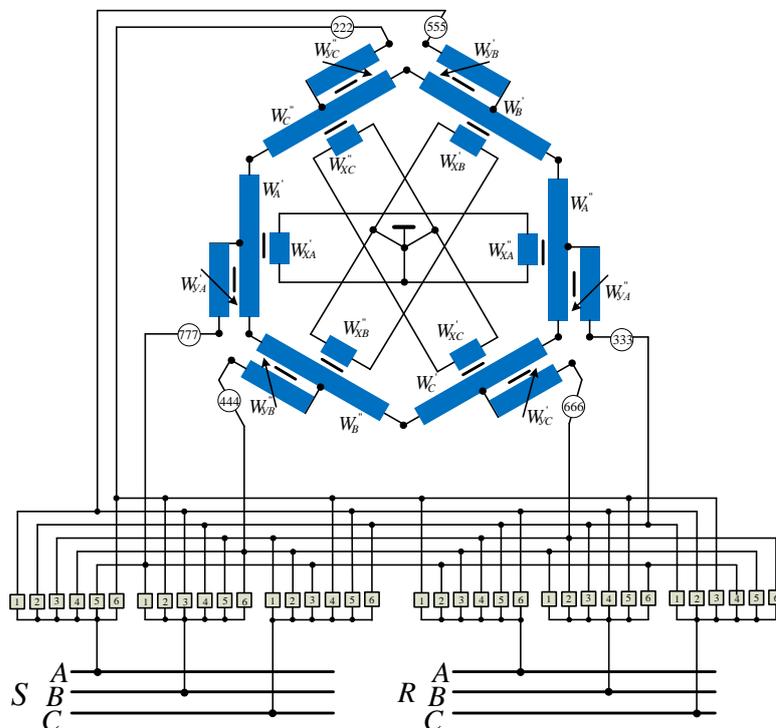


Рис. 37 Принципиальная схема статического преобразователя частоты, выполненного по схеме «шестиугольник»

Представленное устройство также позволяет обеспечить УМС на основе реализации принципа кругового вращения фазы выходного напряжения. При этом разделения процесса согласования на поочередную работу каналов, в отличие от устройства, описанного в главе 4, не происходит. Вращение фазы выходного напряжения обеспечивается по закону «грубого» управления с переключением рабочих секторов через  $120^\circ$  (рис. 38).

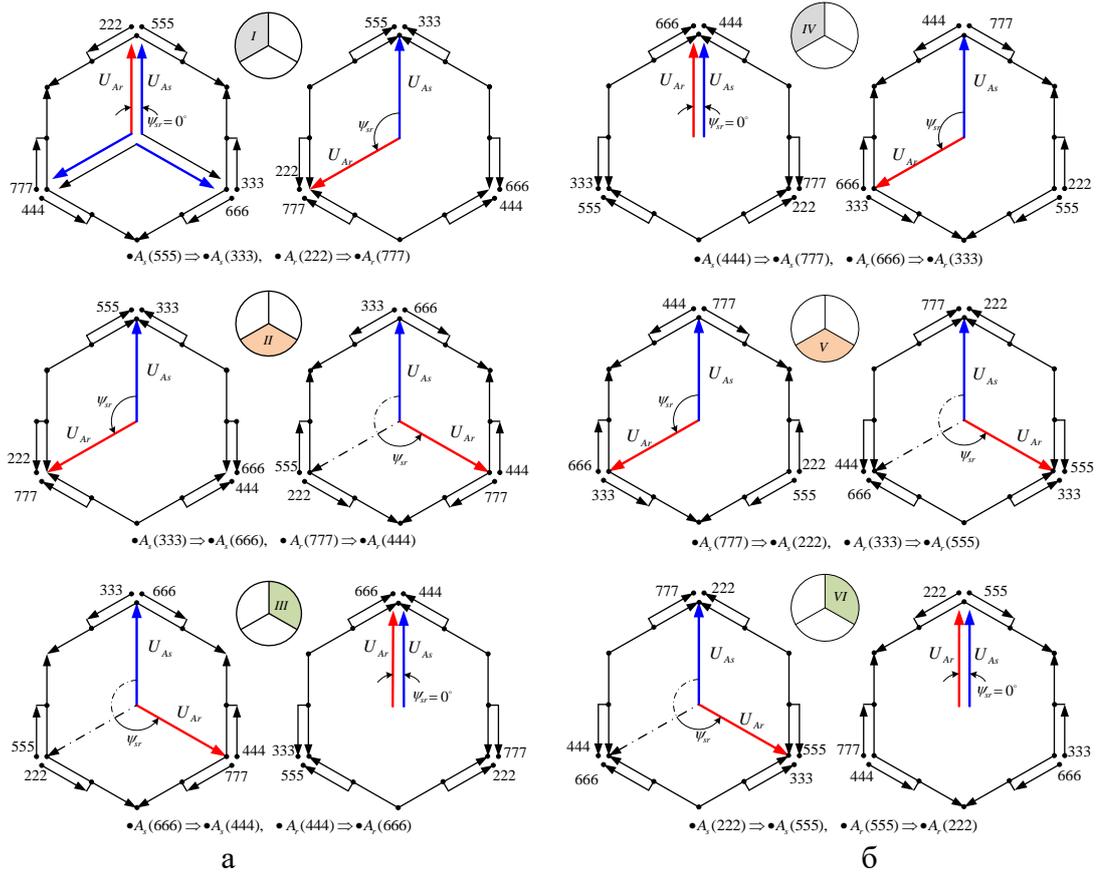


Рис. 38 Векторная диаграмма поясняющая закон «грубого» управления

Векторная диаграмма напряжений, поясняющая работу закона «тонкого» регулирования представлена на рис. 39.

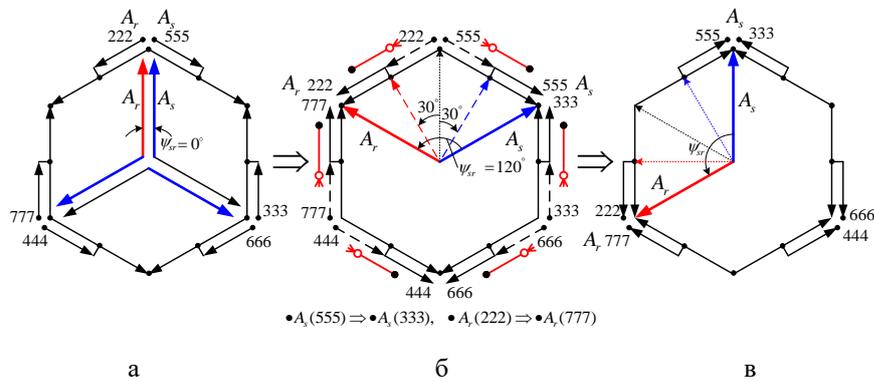


Рис. 39 Векторная диаграмма напряжений первого сектора «грубого» управления

а - исходное состояние устройства; б - процесс обеспечения угла фазового сдвига;  
в - окончание процесса фазового сдвига и срабатывание ключей «грубого» управления.

Варианты секционирования обмоток «тонкого» регулирования и законы переключения ключами на 24 и 48 ступеней регулирования представлены на рис. 17 – 20.

Для исследования режимных параметров статического преобразователя частоты, выполненного по схеме «шестиугольник», были выполнены расчетные эксперименты для двух законов «тонкого» регулирования (рис. 40 – 41).

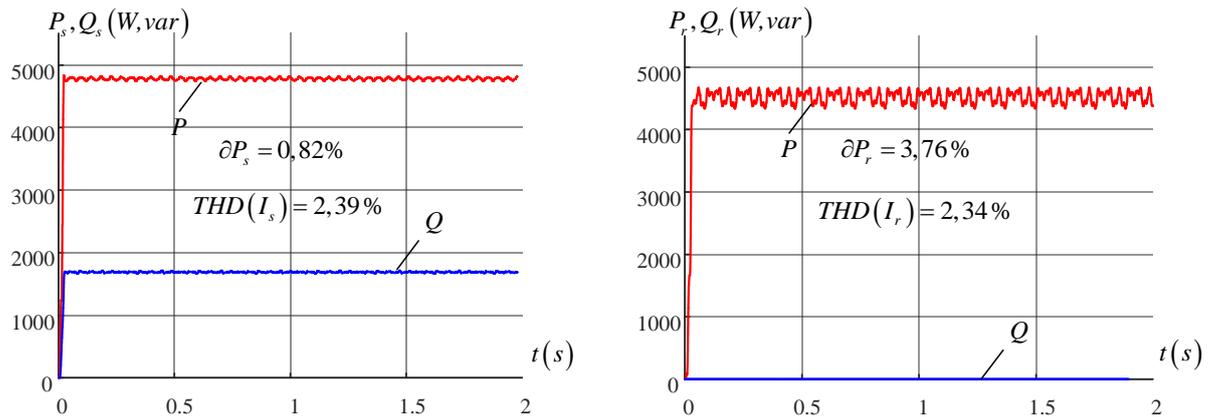


Рис. 40 Мощности на передающей и приемной системах при 24 позиционном секционировании

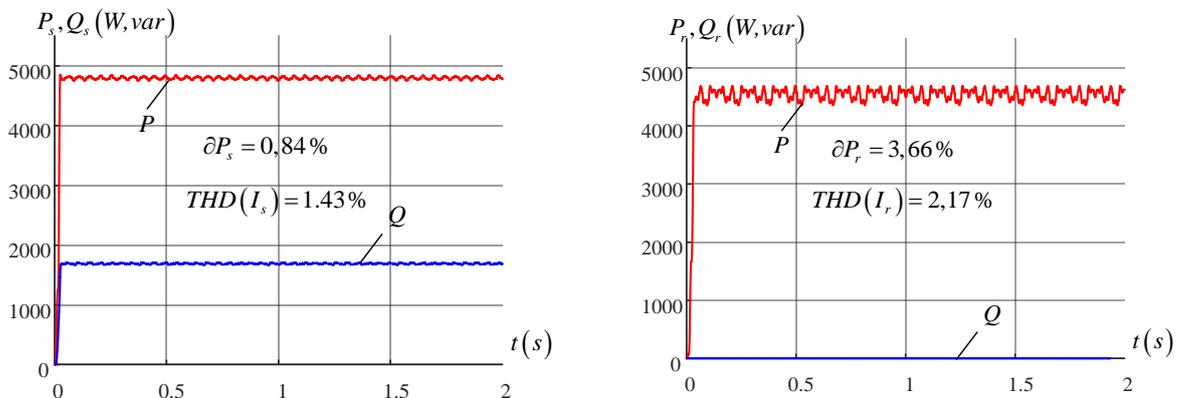


Рис. 41 Мощности на передающей и приемной системах при 48 позиционном секционировании.

Для изучения возможности улучшения рабочих характеристик устройства было предложено применить при построении схемы УМС принцип многоканальности. Для этого были: разработаны согласующие трансформаторы (рис. 42 – 43), позволяющие обеспечить корректную работу устройства при различном количестве каналов; согласованы начальные положения силовых ключей законов «тонкого» регулирования при работе устройства в многоканальном режиме.

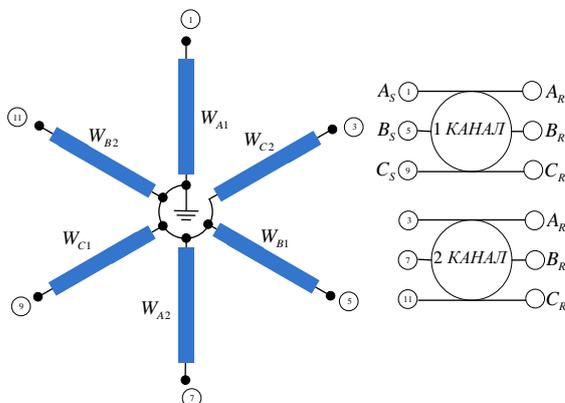


Рис. 42 Согласующий трансформатор для двухканального преобразователя

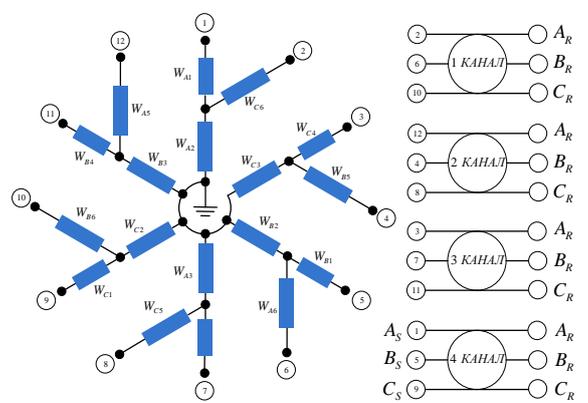


Рис. 43 Согласующий трансформатор для четырехканального преобразователя

Для оценки качества преобразования при многоканальной схеме устройства было выполнено исследование работы преобразователя в двух и четырехканальном режиме (рис. 44 – 45) при 24 и 48 позиционном секционировании и уровнях передаваемой мощности 100%, 65% и 30% от номинальной мощности устройства. Результаты исследования представлены в виде гистограмм на рис. 46 – 47.

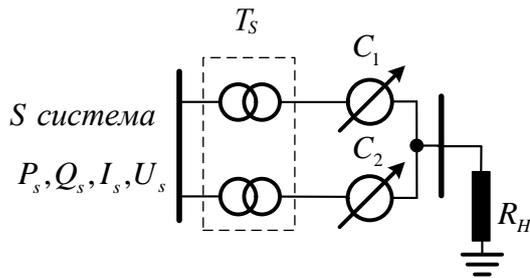


Рис. 44 Схема проведения эксперимента двухканального преобразователя

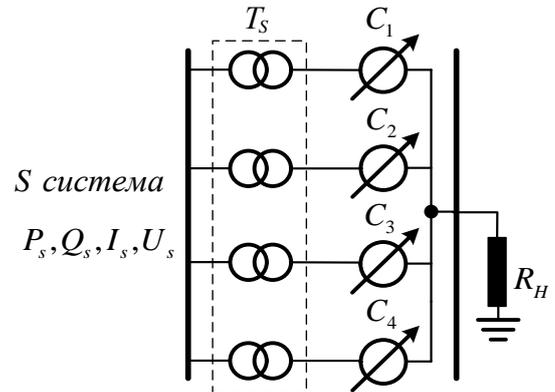


Рис. 45 Схема проведения эксперимента четырехканального преобразователя

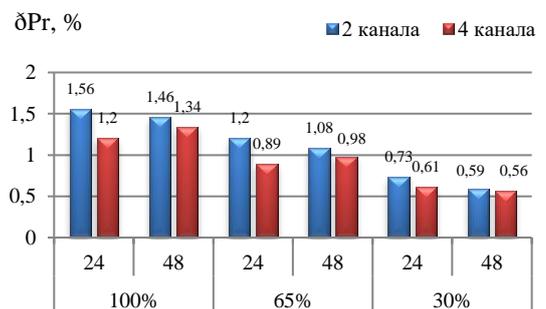
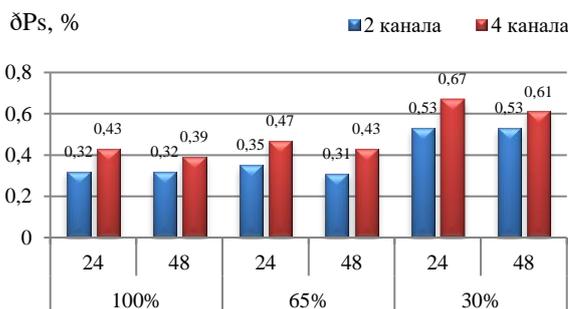


Рис. 46 Гистограммы степеней стабильности передаваемой мощности на передающей ( $\delta P_s$ ) и приемной ( $\delta P_r$ ) системах

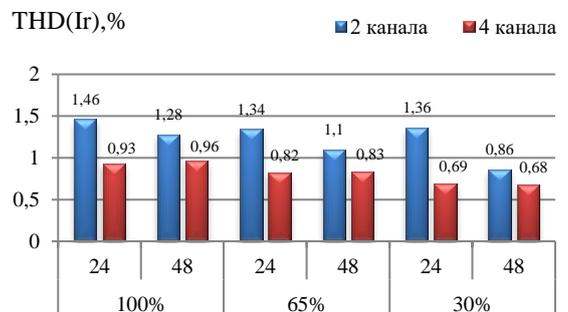
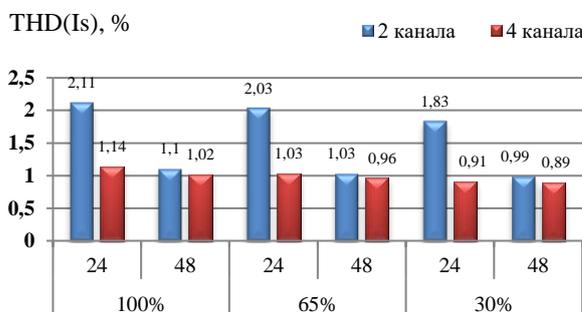


Рис. 47 Гистограммы коэффициентов гармонических искажений тока на передающей ( $THD(I_s)$ ) и приемной ( $THD(I_r)$ ) системах

Сравнительный анализ полученных гистограмм показал преимущество четырехканальной схемы преобразования в сочетании с 48 позиционным секционированием обмотки управления.

Исследование характерных режимов работы устройства при организации УМС проводилось при различном количестве одновременно работающих каналов, а так же при возникновении трехфазного короткого замыкания на шинах передающей системы.

Результаты экспериментов с различным количеством работающих каналов при работе устройства на нагрузку представлены на рис. 48 – 49, а через тридцати градусную ЛЭП на рис. 50 – 51.

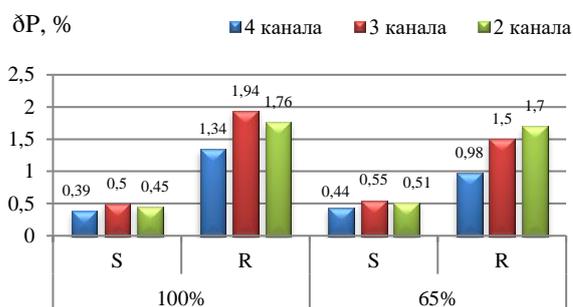


Рис. 48 Гистограмма степеней стабильности передаваемой мощности без ЛЭП

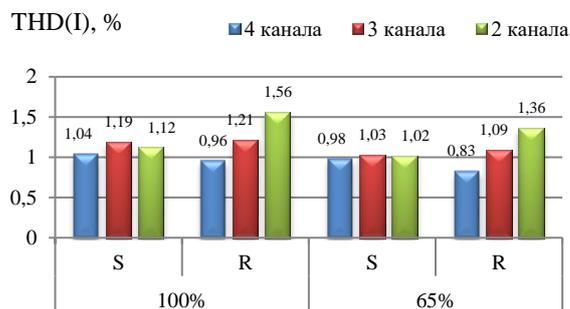


Рис. 49 Гистограмма коэффициентов гармонических искажений тока без ЛЭП

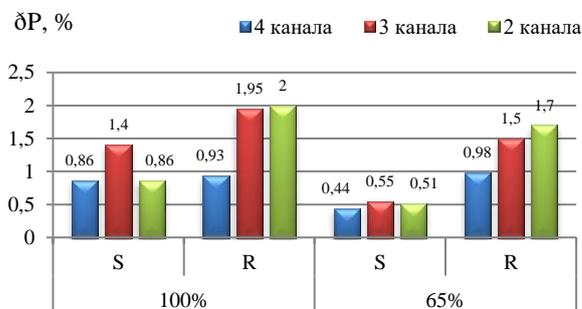


Рис. 50 Гистограмма степеней стабильности передаваемой мощности с ЛЭП

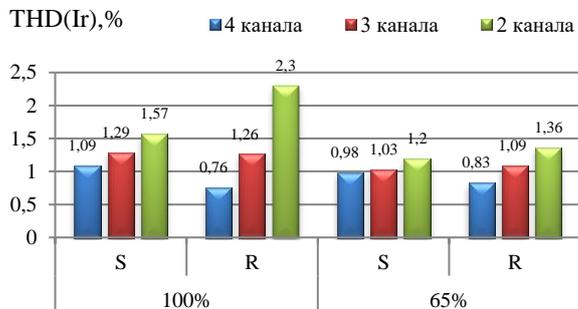


Рис. 51 Гистограмма коэффициентов гармонических искажений тока с ЛЭП

Гистограммы, представленные на рис. 48 – 51 указывают на то, что устройство позволяет удерживать режимные показатели ( $\delta P, \%$  и  $THD(I), \%$ ) в допустимых пределах при различном количестве работающих каналов. Так же построенные гистограммы позволяют сделать вывод о возможности создания стандартизованного образца преобразователя и обеспечении его серийного производства, что впоследствии позволит снизить стоимость преобразователей такого типа.

Осциллограммы мощностей характеризующие работу устройства при возникновении трехфазного короткого замыкания на шинах передающей системы (рис. 52), представлены на рис. 53 – 56.

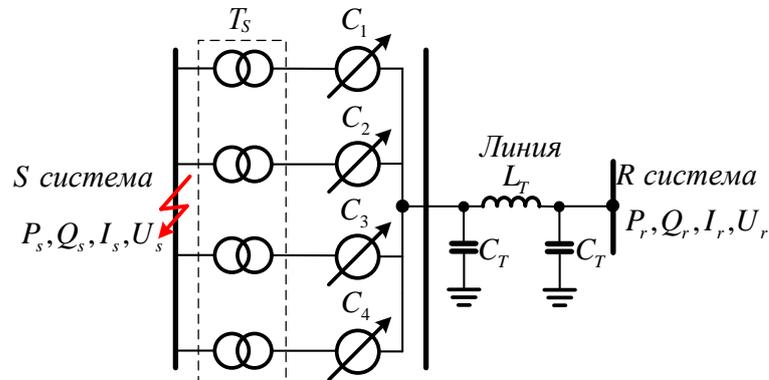


Рис. 52 Схема проведения эксперимента при КЗ на шинах приемной системы

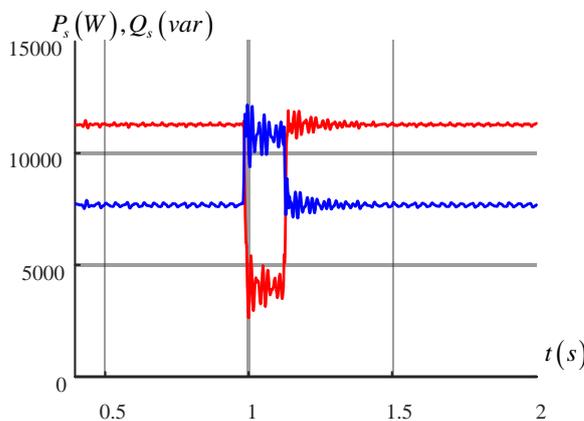


Рис. 53 Мощности на передающей системе

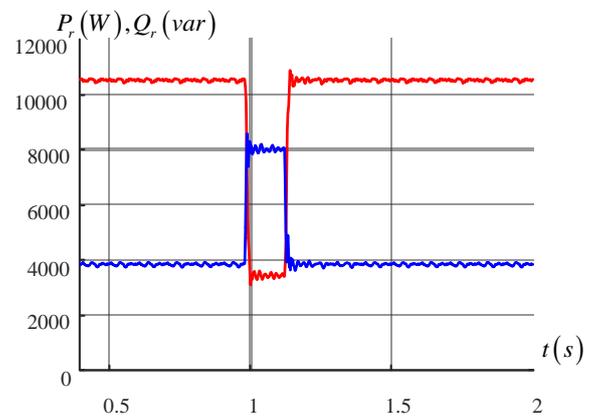


Рис. 54 Мощности на приемной системе

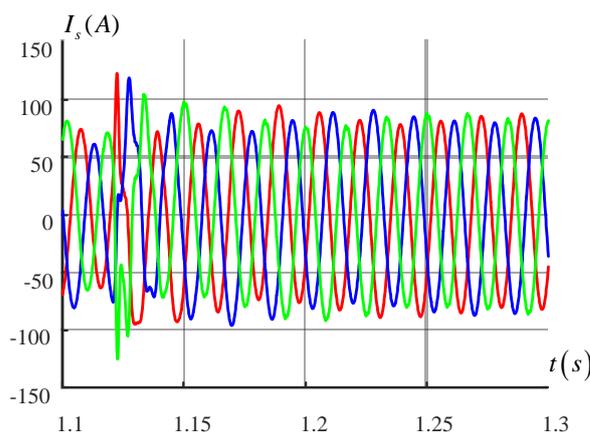


Рис. 55 Ток на передающей системе в момент отключения короткого замыкания

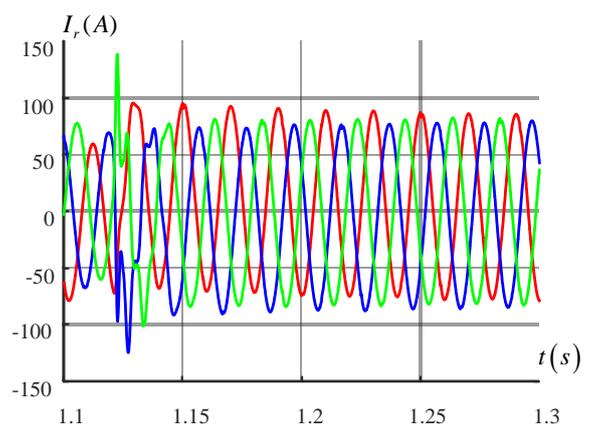


Рис. 56 Ток на приемной системе в момент отключения короткого замыкания

Результаты исследования характерных режимов работы устройства показали, что независимо от места возникновения возмущения, 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.

Проведенное исследование указывает на то, что многоканальный вариант устройства позволяет: организовать УМС переменного тока без применения фильтрокомпенсирующих устройств; примененный принцип многоканальности позволяет улучшить качество преобразования; обеспечить возможность взаимозаменяемости отдельных элементов исследуемого устройства тем самым повысить надежность УМС переменного тока.

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

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

1. Исследования в области существующих способов организации УМС переменного тока показали, что разработанное 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  $\pm 3$  Гц.

2. Предложены математические модели преобразовательных устройств на основе источников неизменного тока, а так же на основе статических трансформаторов, доказывающие возможность реализации УМС переменного тока между двумя энергосистемами с разными стандартами частоты.

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 с разными стандартами по частоты. Применение гармо-

нических фильтров и демпферов, в этом случае, позволило уменьшить коэффициент гармонических искажений на передающей системе с 7,02% до 4%, а на приемной системе с 8,31% до 5,07%, что удовлетворяет 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  $\pm 10$  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. Доказана эффективность 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 пятью основными публикациями и доложены на трех конференциях.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. 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>
2. Kalinin L.P., Zaitsev D.A., Tirsu M.S., **Caloşin D.N.**, *The new variant of adaptive interphase power controller with a wide range of controllability*. Collection of works 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN POWER SYSTEMS, MPS 2017 Cluj-Napoca, 06-09 июня 2017 г. Proceedings - 2017 International Conference on Modern Power Systems, MPS 2017 7. 2017. с. 7974381. DOI: 10.1109/MPS.2017.7974381, (SCOPUS);
3. **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
4. 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 октября 2017 г. 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. с. 87-91. DOI: 10.1109/CIEM.2017.8120843, (SCOPUS);
5. Tirsu M., Calinin L., Zaitsev D., Golub I., **Kaloshin D.**, *Means and methods for active and reactive power exchange/regulation*. LAP LAMBERT Academic Publishing, ISBN: 978-620-2-06664-8, 2017, 126pp.
6. **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);
7. 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 Electroenergetica pp. 31-41, ISSN 1857-0070 1 (36) 2018, DOI: 10.5281/zenodo.3713403 (THOMSON).

## 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, 170 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.

**КАЛОШИН ДАНИЛА**

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

**221.01 – ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Aprobat spre tipar: 22.06.21	Formatul hîrtiei 60x84 1/16
Hîrtie ofset. Tipar RISO.	Tiraj 20 ex.
Coli de tipar.: 1,88	Заказ №.

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

Editura "Tehnica-UTM"

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

© UTM, 2021