Лаборатория электроэнергетического оборудования и силовой электроники

УПРАВЛЯЕМЫЕ МЕЖСИСТЕМНЫЕ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Калинин Л.П.
Зайцев Д.А.
Тыршу М.С.
Голуб И.В.
Калошин Д.Н.

Кишинев–2022

CZU 621.314(043)
S 677

Институт Энергетики

Лаборатория электроэнергетического оборудования и силовой электроники

Рекомендовано к изданию Ученым Советом Института Энергетики

Лаборатория проводит исследования в области разработки и моделирования современных средств управления режимами работы энергетических систем, разработкой сценариев развития республиканской энергосистемы при реализации проектов диверсификации поставок электроэнергии.

В настоящее время основное направление научных исследований лаборатории направлено на разработку и исследование новых технических решений на основе FACTS - технологий, с улучшенными технико-экономическими характеристиками, повышающих степень управляемости и надежности системообразующих и распределительных сетей, в соответствии со стратегией развития SmartGrid в энергосекторе.

В работе выполнен обзор существующих технологий объединения энергосистем, а также предложен и исследован ряд новых, преобразовательных устройств трансформаторного типа для организации управляемых межсистемных связей переменного тока. Основой предлагаемых преобразователей являются фазорегулирующие трансформаторы (ФРТ) различных схемных исполнений, реализующих стратегию кругового вращения фазы выходного напряжения относительно входного. Задача разработки и исследования новых технических решений в этой области актуальна и значима как с точки зрения оптимизации параметров ФРТ, так и для повышения эффективности, гибкости и надежности работы современных электроэнергетических систем.

DESCRIEREA CIP A CAMEREI NAŢIONALE A CĂRŢII DIN REPUBLICA MOLDOVA

Управляемые межсистемные связи на основе фазорегулирующих трансформаторов / Калинин Л.П., Зайцев Д.А., Тыршу М.С. [и др.]; Institutul de Energetică, Лаборатория электроэнергетического оборудования и силовой электроники – Кишинэу: Б.и., 2022 (Logosprint). – 200 p. : des., tab.

Bibliogr.: p.121-130)156 tit.)

ISBN 978-9975-3326-5-1).

621.314
У 677

ISBN 978-9975-3326-5-1
© Институт Энергетики, 2022
Tipografia „Logosprint” SRL, mun.Chişinău, str. Vasile Lupu, 33/3

СОДЕРЖАНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ……. 5
ВВЕДЕНИЕ…… 6
1. ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА КАК ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ……. 13
1.1. Общие положения……. 13
1.2. Варианты секционирования обмоток и законы управления углом фазового сдвига……. 16
1.3. Фазорегулирующее устройство по схеме «звезда»…….. 19
1.4. «Однотрансформаторное фазорегулирующее устройство с регулированием в нейтрали»……. 27
1.5. Фазорегулирующее устройство по схеме «треугольник»…….. 34
1.6. Фазорегулирующее устройствопо схеме «модифицированный треугольник»……. 38
1.7. Фазорегулирующее устройство по схеме «инвертированный многоугольник»…… 41
1.8. Фазорегулирующее устройство по схеме «модифицированный многоугольник»…… 43
1.9. Фазорегулирующее устройства в «гексагональной» конфигурации….. 46
1.10. Сравнительный анализ энергетических характеристик различных схемных вариантов ФРТ……. 49
2. ЧАСТОТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ФРТ С КРУГОВЫМ ВРАЩЕНИЕМ ФАЗЫ…… 51
2.1. Общие положения……. 51
2.2 Математическое обоснование возможности реализации принципа кругового вращения фазы на основе трансформаторного устройства…… 51
2.3 УМС на базе фазорегулирующего устройства по схеме «треугольник» 57
2.4 УМС на базе преобразователя выполненного по схеме «зигзаг»……. 67
2.5.УМС на базе преобразователя, выполненного по схеме «шестиугольник»……. 83
3. КОМБИНИРОВАННЫЕ FACTS НА ОСНОВЕ ФРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСТОЧНИКОВ НЕИЗМЕННОГО ТОКА (ТЕХНОЛОГИЯ IPC)…… 96
3.1 Математическая модель преобразователя частоты на основе источника неизменного тока…….. 96
3.2 Статический преобразователь частоты на основе источников неизменного тока…….. 104
3.3 Источник реактивной мощности, управляемый ФРТ…… 116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…… 119
БИБЛИОГРАФИЯ…… 121
ПРИЛОЖЕНИЯ…… 131
Приложение 1. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме «звезда»……... **131**
Приложение 2. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме «однотрансформаторный с регулированием в нейтрали»……. **135**
Приложение 3. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме «треугольник»…… **138**
Приложение 4. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме «модифицированный треугольник»……. **143**
Приложение 5. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме «инвертированный многоугольник»…… **151**
Приложение 6. Режимные параметры ФРТ, выполненного по схеме **157**

«модифицированный многоугольник»……
Приложение 7. Режимные параметры ФРТ, выполненного в «гексагональной» конфигурации……. **162**
Приложение 8. Результаты расчета и имитационного моделирования статических характеристик преобразователя частоты на основе источников неизменного тока (IPC)…….. **167**
Приложение 9. Результаты расчетных экспериментов при имитационном моделировании работы преобразователя частоты по схеме «зигзаг»…… **176**
Приложение 10. Результаты экспериментов при работе преобразователя частоты по схеме «шестиугольник»……. **189**

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

FACTS	Flexible Alternative Current Transmission Systems
УМС	Управляемые межсистемные связи
МГЭС	Межгосударственные электрические связи
МГЭО	Межгосударственные электрические объединения
ВПТ	Вставка Постоянного Тока
ФПУ	Фазоповоротный трансформатор
ФРТ	Фазорегулирующий трансформатор
АСЭМПЧ	Асинхронизированныйсинхронныйэлектромеханический преобразователь частоты
КЗ	Короткое замыкание
ВЛ	Воздушная Линия
ЭЭС	Электроэнергетические системы
IPC	Interphase Power Controller
ЛЭП	Линия электопередач
SPS	Sim Power Systems
HVDC	A High-Voltage, Direct Current
VFT	Voltage FrequencyTransformer
THD	Total Harmonic Distortion
ИРМ	Источник реактивной мощности
КПД	Коэффициент полезного действия
УПКФРТ	Продольная компенсация, управляемая фазорегулирующим трансформатором

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире роль электричества и электроэнергии в целом огромна. Электричество сопровождает человека повсюду. Существование человечества сегодня невозможно представить без потребления энергии. Удовлетворение потребностей, улучшение условий жизни, увеличение ее продолжительности - все это требует доступной энергии. За последние время рост потребления энергии стал особенно стремительным, индустриальная эпоха внесла в это свой вклад. В современном мире энергетика является основой развития базовых отраслей промышленности, определяющих прогресс общественного производства. Во всех промышленно развитых странах темпы развития энергетики опережают темпы развития других отраслей [55,57,61,78].

Современное состояние мировой энергетики характеризуется следующими тенденциями:

- продолжающимся ростом нагрузок, определяемым развитием экономики страны;
- большой плотностью электрических сетей различных классов напряжения;
- повышенными экологическими требованиями к объектам электроэнергетики, что вызывает определенные сложности в сооружении новых линий электропередач;
- формированием объединенных энергосистем с организацией управляемых межсистемных связей (УМС);
- внедрением рыночных отношений в электроэнергетике, что вызывает не всегда предусмотренный диспетчерским графиком обмен мощностью и энергией между отдельными энергетическими компаниями, электроэнергетическими системами и крупными регионами;
- стремлением использовать наиболее дешевые источники электроэнергии, расположенные, как правило, в отдаленных районах;
- крупными авариями, возникающими обычно из-за слабости отдельных межсистемных связей и приводящими к обесточиванию крупных регионов.
- неэкономичное распределение нагрузки между сетями более высокого номинального напряжения и низкого, слабость некоторых межсистемных связей, изменение перетоков мощности в соответствии с требованиями энергорынка [55,58].

Очевидно, что для решения современных проблем энергетического комплекса необходимо повышать управляемость системы, что ведет к разработке концепций и средств управления на различных уровнях иерархии. Таким образом, вопросы повышения управляемости электрических сетей за счет применения специальных технических средств в настоящее время весьма актуальны.

Эти средства должны обеспечить решение следующих задач:

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

Для решения вопросов повышения степени управляемости в настоящее время в мире предлагается так называемая концепция интеллектуальных сетей (SMART GRID), которая является частью энергетических программ ведущих стран [47,3,79,64,63].

SMART GRID — это совокупность подключённых к генерирующим источникам и потребителям «интеллектуальных» устройств – линий электропередачи, преобразователей электроэнергии, коммутационных аппаратов, устройств защиты и автоматики, современных информационно-технологических и управляющих систем, источников генерации, в том числе использующих возобновляемую энергию, – снабженная системой мониторинга и автоматического управления распределёнными техническими средствами [67].

Следует отметить, что информационные системы и управление – это надстройка, превращающая обычные электросети в интеллектуальные, но в базисе у SMART GRID

находится силовое сетевое оборудование способное реально управлять режимами сетей и потоками энергии. Таким образом, силовые управляемые устройства FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) активно-адаптивных сетей играют решающую роль в реализации этой технологии на практике [123].

Суть FACTS технологий состоит в том, что электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей [38,49,123].

Благодаря FACTS удается:

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

Процесс интеграции электроэнергетических систем и формирование межгосударственных электрических связей (МГЭС) и объединений (МГЭО) является глобальной тенденцией в современной электроэнергетике [128,129,26,46]. Основные проекты объединения МГЭО в глобальном масштабе представлены на рис.В.1.

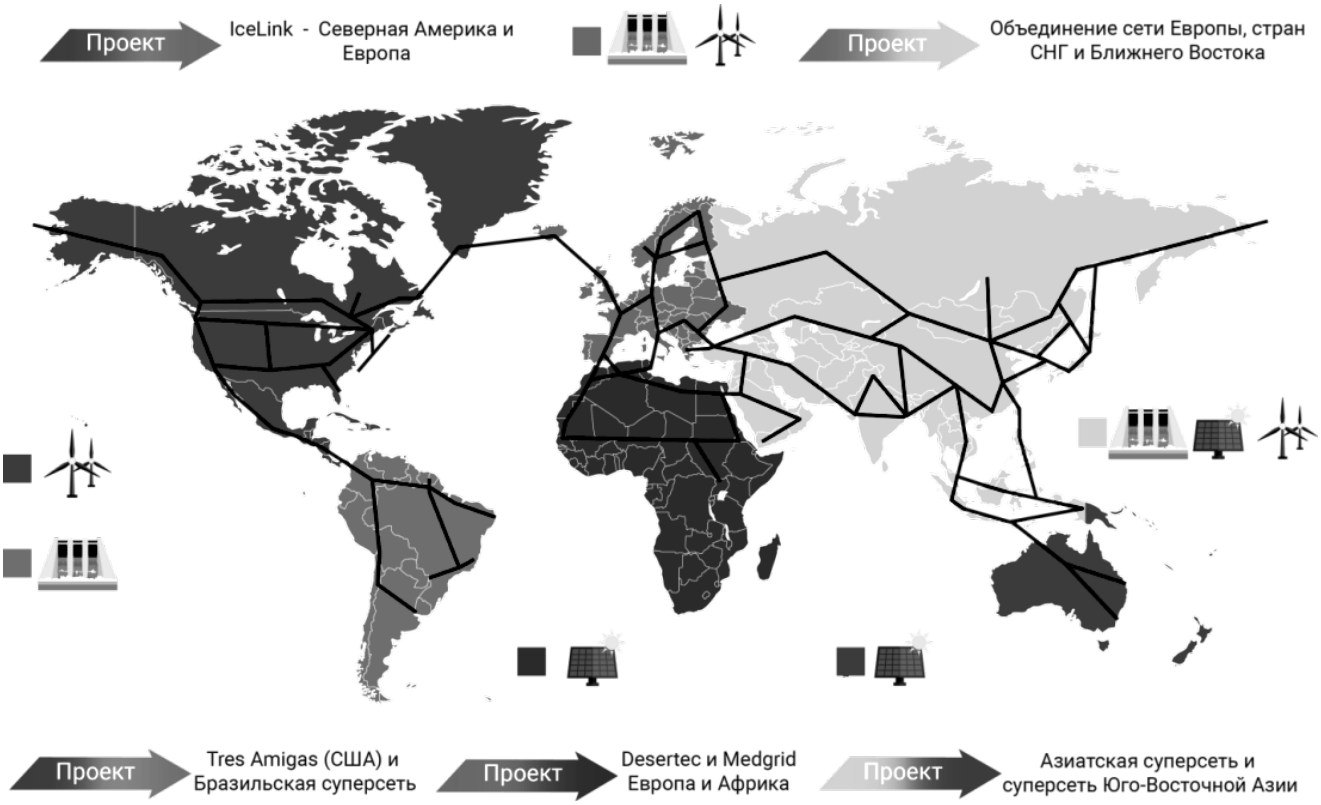


Рис.В.1. Основные проекты объединения МГЭО

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 супер энергообъединения [128,129,11,27].

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 реверсным броскам мощности в межсистемных связях, что оказывает влияние на устойчивую работу связей или к возникновению крупных каскадных аварий в объединенных энергосистемах [133].

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 УМС [150].

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 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 [146,156].

Примером этого может служить энергетическая стратегия Республики Молдова [156], в соответствии с которой предусматриваются мероприятия по объединению Молдавской и Румынской электроэнергетических систем, за счет организации асинхронного подключения Республики Молдова к ENTSO-E. Запланированная стратегическая цель может быть достигнута путем установки вставок постоянного тока (ВПТ) на воздушных линиях Вулкэнешть-Исакча 400 кВ, Бэлць-Сучава 400 кВ, Стрэшень-Яссы 400кВ, так как данные устройства удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к УМС, хорошо проработаны 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 [143,156,121].

Альтернативой передачам и вставкам постоянного тока выступают вращающийся трансформатор с изменяемой частотой вращения (VFT) компании «General Electric» (США) и асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты (АСЭМПЧ) (Россия) [30,34,152,155]. Представленные устройства выгодно отличаются от передач и вставок постоянного токанизким содержаниемвысших 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.

В данной монографии рассмотренысуществующие технологии объединения энергосистем, а также предложен ряд новых преобразовательных устройств,трансформаторного типа для организации УМС переменного тока, обладающиерядом преимуществ. Основой, предлагаемых частотных преобразователей являются фозорегулирующие трансформаторы различных схемных исполнений, реализующие стратегию кругового вращения фазы выходного напряжения относительно входного. К преимуществам устройств, построенных на этих принципах, следует отнести отсутствие преобразовательной техники, гармонических фильтров и демпферов, больших вращающихся масс, трущихся токосъемных контактов, ограничений в части установленной мощности устройства, свободный обмен реактивной мощностью и, как следствие отсутствие нужды в компенсирующих устройствах.

Задача разработки и исследования новых технических решений в этой области является актуальной и значимой как с точки зрения создания новых комбинированных FACTS с оптимальными характеристиками, так и для повышения эффективности, гибкости и надежности работы современных электроэнергетических систем.

Общая характеристика средств объединения энергосистем с разными стандартами частоты

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 средств силовой электроники [154,11,53,39,40,42,56].

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 [80,90].

Устройства, выполненные на основе силовой полупроводниковой техники, такие как ППТ и ВПТ находят широкое применение в энергосистемах различных стран мира (рис.В.2) [1,52,95,96,97,108].

Передачи и вставки постоянного тока позволяют:

- 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.

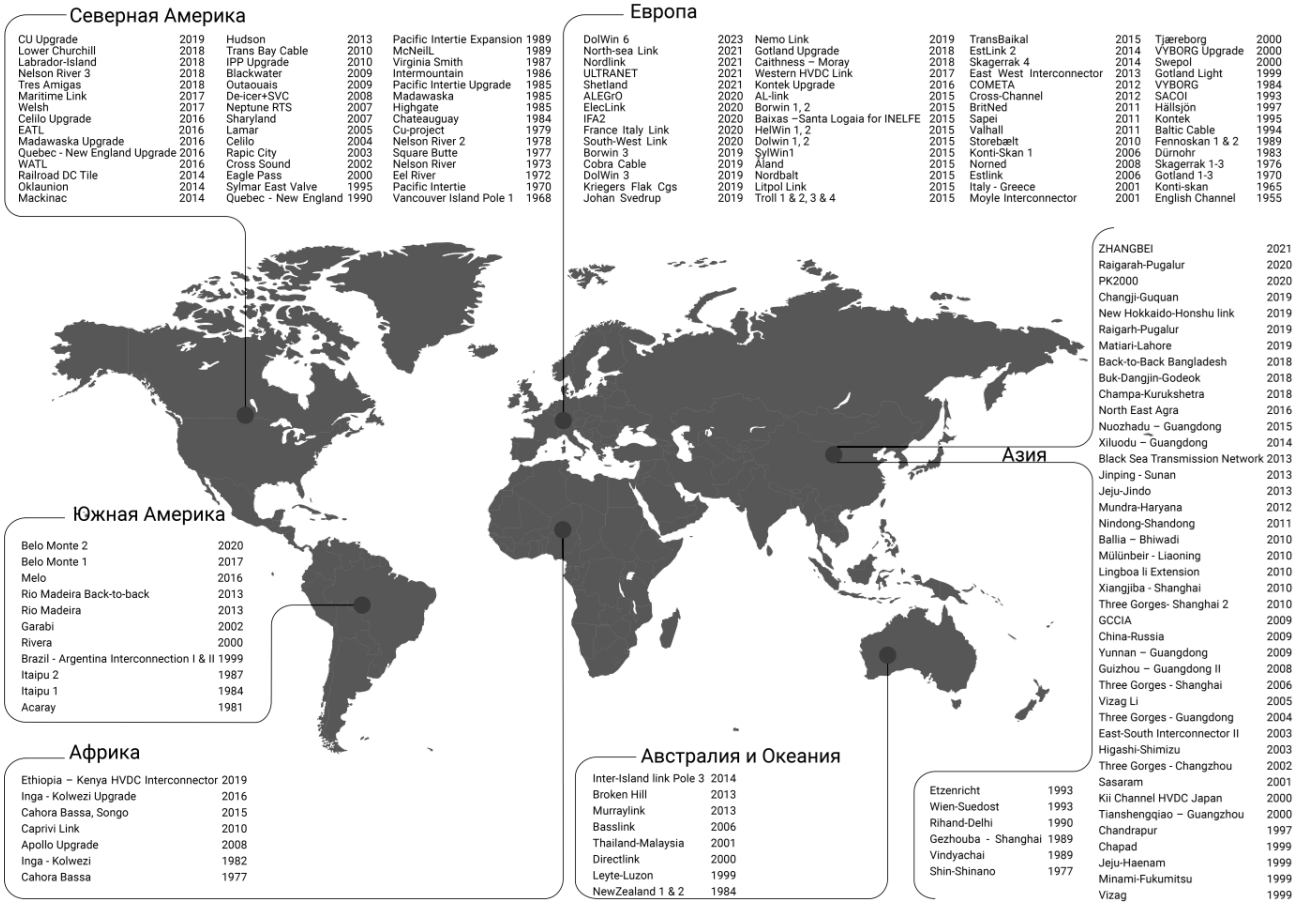


Рис. В.2 Применение ВПТ и ППТ в энергосистемах различных стран мира

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 также 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.

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) ведется с 70–х годов прошлого столетия [137]. 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 [149].

АС ЭМПЧ обеспечивает управление величиной и направлением передаваемой активной мощности в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах, вплоть до реверса, при синхронной и асинхронной работе 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, ограниченных 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 [133].

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.

Вращающийся трансформатор с изменяемой частотой вращения

Объединение, асинхронно или синхронно работающих энергосистем, посредством технологии «Variable frequency transformer» (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 [87].

Основными компонентами технологии VFT является вертикальный вращающийся трансформатор, двигатель постоянного тока и коллектор (рис. В.3).

Обмотка ротора такой машины вращается относительно статора с регулируемой частотой скольжения. Вращение производится двигателем постоянного тока. 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 связываемых энергосистем [126,88].

Инерция вращающейся системы достаточно высокая и поддерживает стабильность работы устройства во время возмущений в сети. Регулятор мощности представляет собой устройство с

обратной связью, что позволяет поддерживать заданную величину передаваемой мощности на постоянном уровне.

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% [126,88].

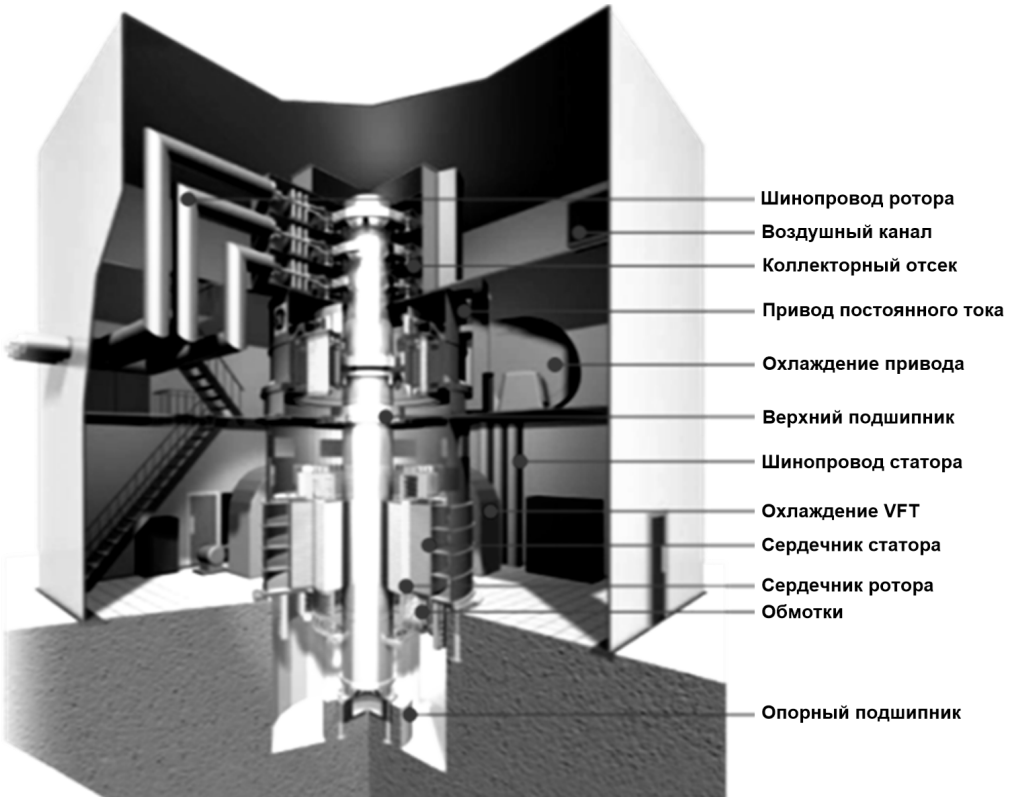


Рис. В.3 Основные компоненты VFT

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

ПреимуществаVFT по отношению к ВПТ:

- 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 в 2 - 3 раза требуемая площадь для размещения установки;
- ниже уровень гармонических искажений.

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.

Исходя из выше сказанного, задачи разработки и исследования новых технических решений в этой области являются актуальными и значимыми.

1. ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА КАК ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИСОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

1.1. Общие положения

Задачи обеспечения эффективного управления установившимися и переходными режимами электроэнергетических систем могут быть решены различными FACTS-контроллерами, одним из которых является ФРТ [13,99]. Фазорегулирующие трансформаторы, управляемые средствами силовой электроники являются на современном этапе одним из основных элементов объединенных энергосистем, позволяющих реализовать Smart Grid технологии на практике [134,127]. Кроме этого они могут стать одним из перспективных решений при реализации УМС комбинированного типа [147,148,9].

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

Фазорегулирующий трансформатор (рис.1.1) в общем случае состоит из двух отдельных трансформаторов: параллельного и последовательного [134].

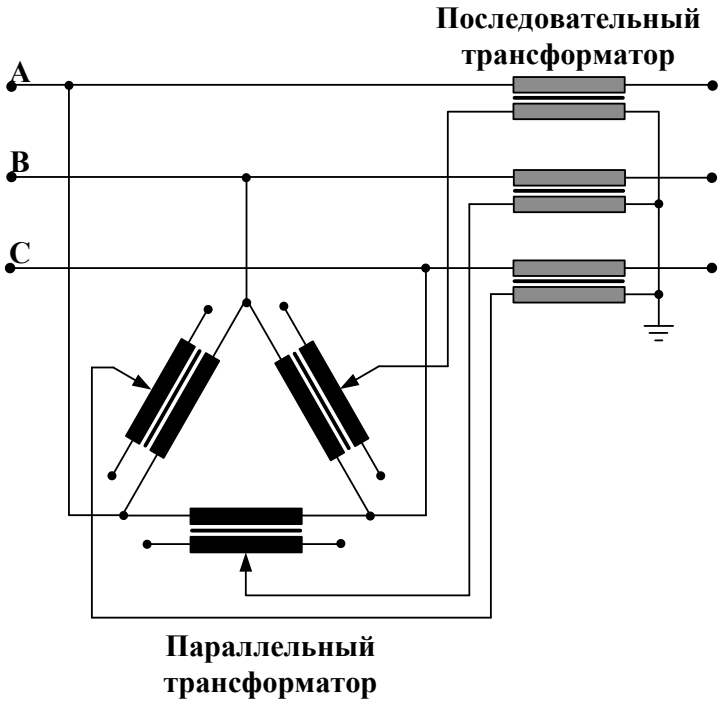


Рис.1.1. Схема фазорегулирующего трансформатора

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

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

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

К специфике этих устройств относят:

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

Особенностью фазосдвигающего трансформатора является возможность его использования только в целях, масштабы которых оправдывают затраты на изготовление такого агрегата. Для личных потребительских нужд (в частных хозяйствах, например) его применение неоправданно и совершенно бессмысленно [59].

Стоимость фазорегулирующих трансформаторов из-за сложности их схемы довольно велика: 4-9 млн. долларов за систему мощностью более 2000 МВА [62]. ФРТ являются технически сложными устройствами, и для удовлетворения уникальных потребностей каждого клиента, они, как правило, разрабатываются по индивидуальному заказу. Однако затраченные на них средства с лихвой окупаются тем выигрышем, который удается получить за счет оптимизации параметров режимов работы энергосистемы [130,62].

Время монтажа ФРТ, как показала практика, составляет только 12÷18 месяцев, что обычно несоизмеримо меньше времени, требующегося на реконструкцию сети или прокладки новых линий электропередачи. Это может оказаться решающим фактором при выборе способа повышения пропускной способности линий электропередачи, в условиях рыночных отношений [134,135].

Способы регулирования фазового сдвига

Регулируемый фазовый сдвиг, вводимый ФРТ, осуществляется посредством введения вольтодобавочного напряжения между входом и выходом ФРТ в месте установки. Чем больший фазовый сдвиг требуется ввести, тем больше будет величина вольтодобавочного напряжения [153].

Формирование вольтодобавочного напряжения осуществляется за счет использования напряжения линии. Это напряжение называется возбуждающим. Возбуждающее напряжение называется независимым, если оно является напряжением линии на входе ФРТ. Возбуждающее напряжение называется зависимым, если это напряжение формируется из напряжения на входе и выходе ФРТ. Существует несколько способов введения вольтодобавочного напряжения: поперечное регулирование, продольно-поперечное регулирование и симметричное регулирование [145,106].

При поперечном («квадратурном») регулировании ФРТ вводит вольтодобавочное напряжение, смещенное на угол ±90° относительно входного напряжения ФРТ, которое является возбуждающим (рис.1.2а). При этом выходное напряжение ФРТ увеличивается по амплитуде и изменяется по фазе. Причем амплитуда выходного напряжения будет тем больше, чем больший угол сдвига потребуется в процессе регулирования. Поэтому данный способ регулирования может применяться при небольших углах регулирования (не более 20°).

При продольно-поперечном регулировании ФРТ вводит вольтодобавочное напряжение из двух составляющих: продольной и поперечной (рис.1.2б). Продольная составляющая смещена относительно входного напряжения на 180°, а поперечная – на ±90°. Поэтому, в этом случае изменение амплитуды напряжения является контролируемым, и она может быть любой, как больше, так и меньше амплитуды входного напряжения или равна ей. Этот способ можно использовать при требуемых углах фазового сдвига более 20°.

При симметричном регулировании ФРТ вводит вольтодобавочное напряжение, смещенное на ±90°. относительно возбуждающего напряжения ФРТ (рис.1.2в). При этом

выходное напряжение ФРТ изменяется только по фазе и не меняется по амплитуде. Поэтому данный способ регулирования может применяться при любых углах регулирования.

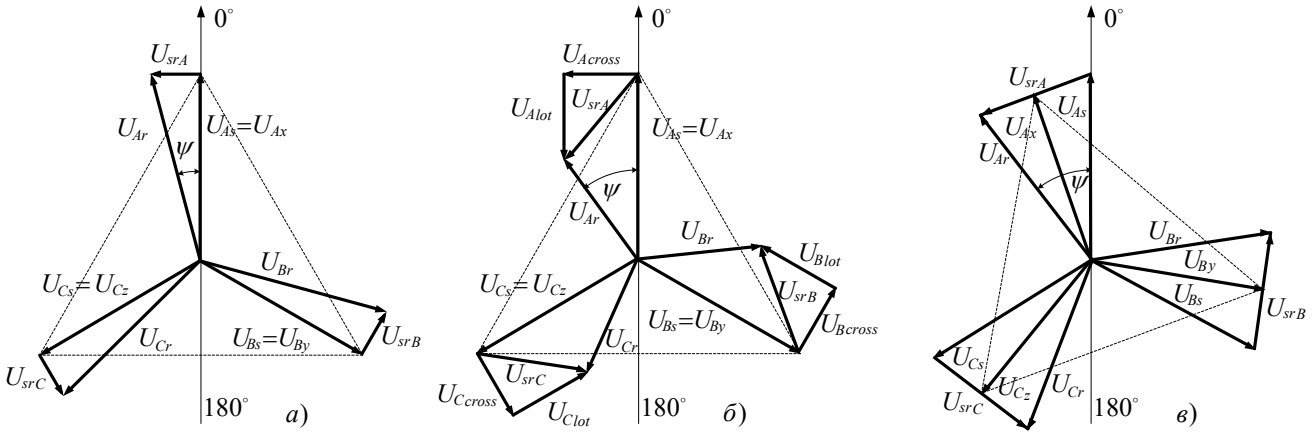


Рис.1.2. Способы регулирования выходного напряжения ФРТ: а) поперечное регулирование, б) продольно-поперечное регулирование, в) симметричное регулирование

где: U_{As} ,U_{Bs} ,U_{Cs} − напряжение на входе ФРТ;

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

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

U_{sr} − вольтодобавочное напряжение;

U_{cross} − поперечная составляющая вольтодобавочного напряжения;

U_{lot} − продольная составляющая вольтодобавочного напряжения.

Средства управления ФРТ

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

В мировой практике широко применяются фазорегулирующие трансформаторы с механическими переключателями числа витков обмоток трансформатора под нагрузкой (РПН) [44].

Однако ФРТ с устройствами РПН не отличаются высокой надежностью [125]. Устройства с механическими переключателями в трансформаторах с РПН выходят из строя в 40% случаев всех повреждений. Из-за наличия движущихся частей трансформаторы с РПН требуют больших затрат на обслуживание и ремонт по сравнению с трансформаторами с ПБВ, переключаемые без возбуждения.

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

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

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

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

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

Основными критериями, влияющими на выбор ФРТ, являются [134]:

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

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

Функции, реализуемые ФРТ в энергосистеме

1. оптимизация нормального режима электрических сетей с точки зрения реализации более благоприятных сценариев загрузки линий электропередачи относительно естественного распределения потоков мощности [32,33,77,54,7,51,114,83,24];

2. плавка гололеда на проводах воздушных линий методом наложения контурного тока промышленной частоты, создаваемого с помощью ФРТ, на рабочий ток соответствующей ветви высоковольтной сети [70,35,36,103,109,20];

3. регулируемая продольная компенсация линии электропередачи, реализованная на основе параллельного соединения конденсаторной батареи и фазорегулирующего устройства [68,13];

4. использование ФРТ в составе IPC (Interphase Power Controller) для поддержания стабильного уровня обменной мощности между узлами энергосистемы [12,14,15,6,82,120,94,86];

5. управление переходными режимами и как следствие повышение уровня статической и динамической устойчивости [37,100,45,23,4,85,25];

6. для снятия ограничений на выдачу мощности в различных послеаварийных и ремонтных режимах распределительной электросети и расширения возможного диапазона выдачи мощности в нормальных режимах;

7. совершенствование характеристик и увеличение резерва мощности подстанций [134];

8. управление режимами межсистемных и межгосударственных связей [10,115,99,102,116,110,50,8].

1.2. Варианты секционирования обмоток и законы управления углом фазового сдвига.

Применение быстродействующего управления, обеспечиваемого силовыми ключами, дает ряд преимуществ, позволяющих использовать фазорегулирующие устройства в качестве активных элементов современных Smart Grid систем. В связи с этим были разработаны схемы и законы управления углом фазового сдвига на основе средств силовой электроники, обеспечивающие требуемую дискретность шага регулирования.

В зависимости от требований, предъявляемых к фазорегулирующему трансформатору, с точки зрения точности регулирования угла выходного напряжения, разработаны несколько возможных схем обмоток управления. Для каждой схемы секционирования обмоток управления были предложены законы переключения силовых ключей, которые обеспечивают необходимый диапазон регулирования угла фазового сдвига.

Схема обмотки и закон управления на 7 ступеней регулирования, приведены на рис.1.3,1.4. соответственно.

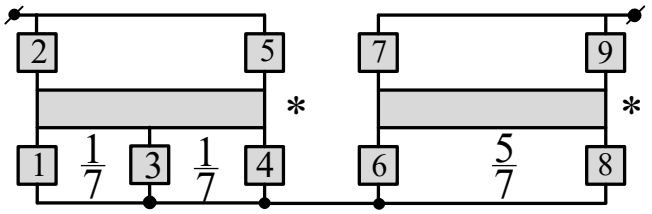


Рис.1.3. Схема обмотки управления на 7 ступеней регулирования

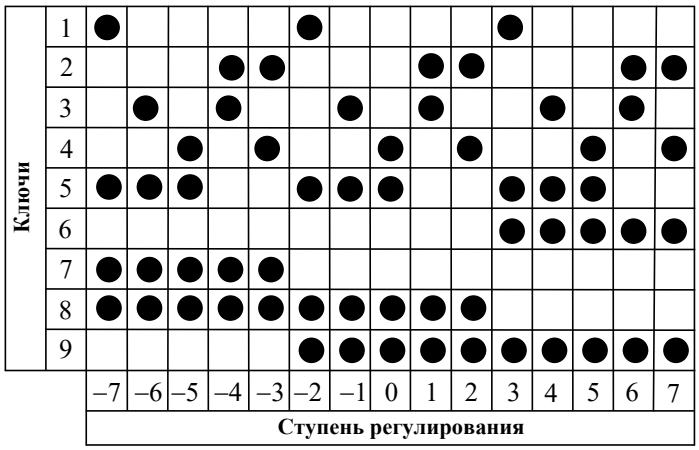


Рис.1.4. Закон управления силовыми ключами

Схема обмотки и закон управления на 10 ступеней регулирования, приведены на рис.1.5,1.6. соответственно.

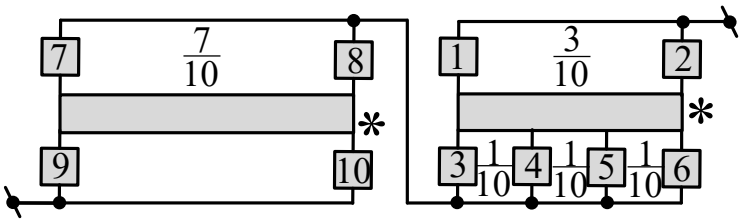


Рис.1.5.Схема обмотки управления на 10 ступеней

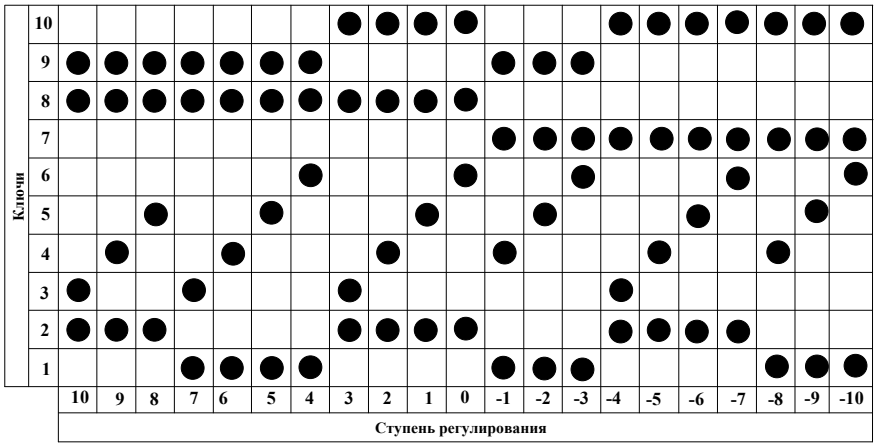


Рис.1.6.Закон переключения силовыми ключами

Схема обмотки и закон управления, для 12 ступеней регулирования приведены на рис.1.7,1.8 соответственно.

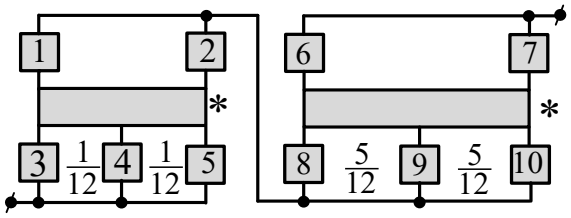


Рис.1.7.Схема обмотки управления на 12 ступеней регулирования

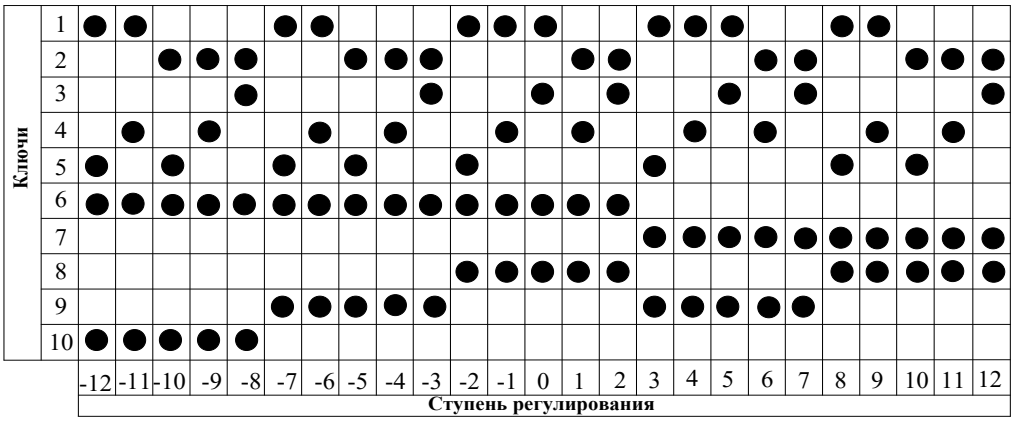


Рис.1.8. Закон переключения силовымиключами

Схема обмотки и закон управления на 15 ступеней регулирования, приведены на рис.1.9,1.10 соответственно.

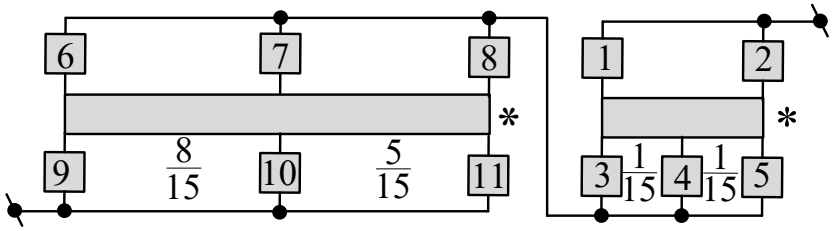


Рис.1.9. Схема обмотки управления на 15 ступеней регулирования

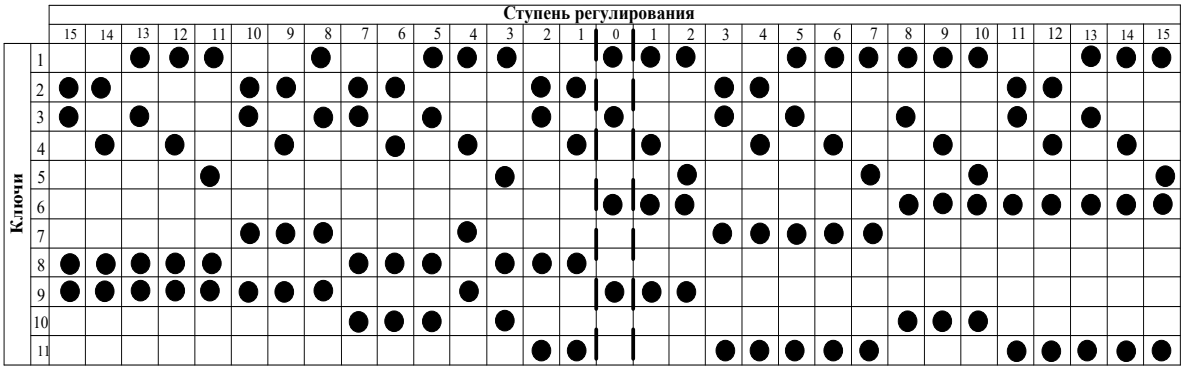


Рис.1.10. Закон управления силовымиключами

Схема обмотки и закон управления на 24 ступени регулирования, приведены на рис.1.11, 1.12 соответственно.

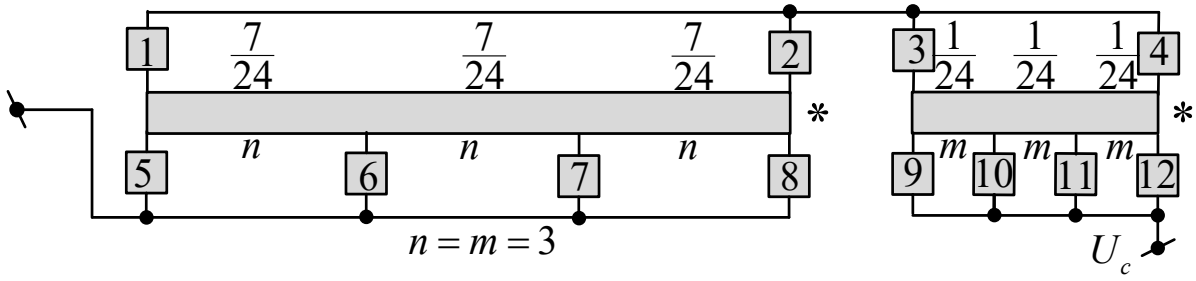


Рис.1.11. Схема обмотки управления на 24 ступени регулирования

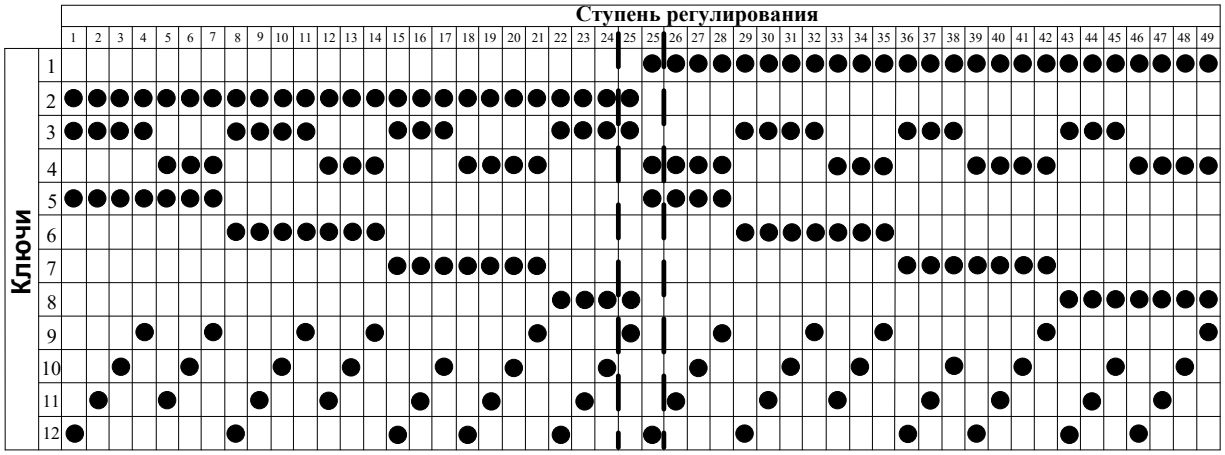


Рис.1.12.Закон управления блоком «тонкого» регулирования с дискретностью ступени 2,5°

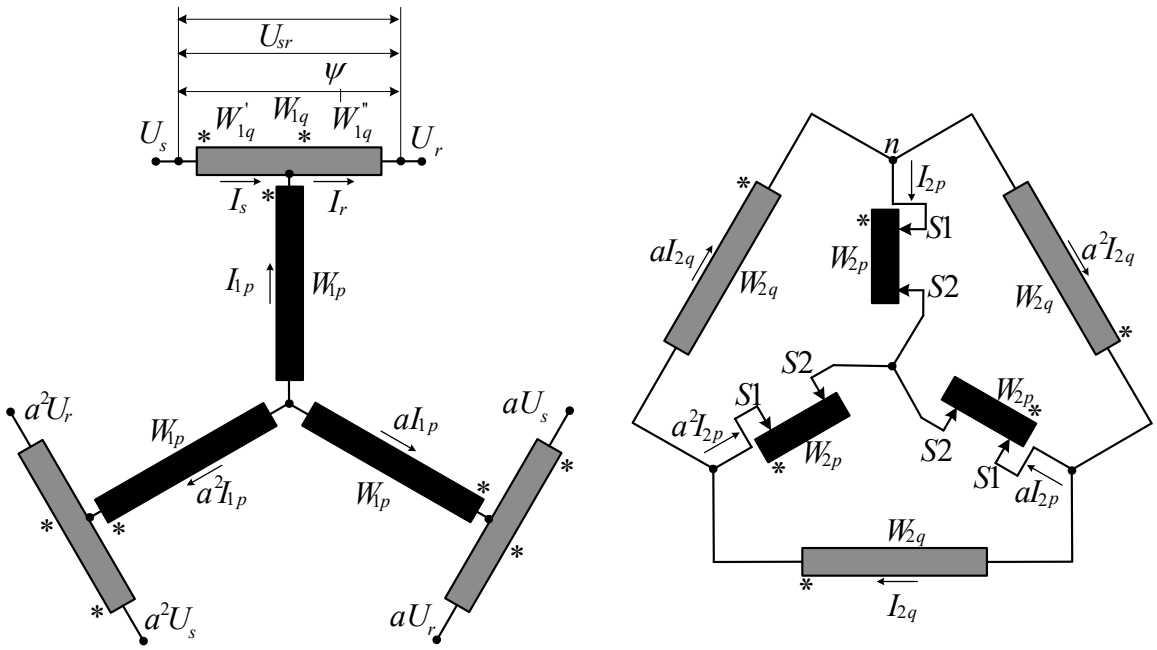
Рассмотренные выше схемы и законы управления обмотками были использованы при моделировании режимов работы объектов исследования и определении их рабочих характеристик.

1.3.Фазорегулирующее устройство по схеме «звезда»

Схема и описание устройства

Основными элементами ФРТ, выполненного по схеме «звезда», являются два силовых трансформатора, один из них выполняет функции намагничивающего (или параллельного), другой – функции фазосдвигающего (или последовательного) элемента. На схеме рис.1.13 обмотки и соответствующие электрические величины, характеризующие режим намагничивающего трансформатора помечены индексом «p», обмотки и электрические

величины фазосдвигающего трансформатора - индексом «q». Схемы электрических соединений устройства на стороне высокого напряжения отражены на рис.1.13а, на стороне низкого напряжения – на рис.1.13б.



а б

Рис.1.13. Схема фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме «звезда»

Регулирование фазового сдвига ψ выходного напряжения U_r относительно напряжения на входе U_S осуществляется встречным перемещением контактов $S1,S2$ механизма переключения под нагрузкой по ответвлениям низковольтной регулировочной обмотки W_{2p} намагничивающего трансформатора. Высоковольтные обмотки фазосдвигающего трансформатора W_{1q} имеют средние точки, к которым подключаются высоковольтные выводы обмоток W_{1p} намагничивающего трансформатора [136,138,140]. Благодаря этому, достигается достаточно высокая стабильность выходного напряжения по величине в процессе регулирования угла ψ.

Математическая модель устройства

Уравнение электромагнитного баланса фазосдвигающего трансформатора записывается следующим образом:

$$I_s \frac{W_{1q}}{2} + I_r \frac{W_{1q}}{2} = I_{2q} W_{2q}. \tag{1.1}$$

Тогда ток вторичной обмотки фазосдвигающего трансформатора, характеризуется соотношением:

$$I_{2q} = \frac{1}{2k_q}\left(I_s + I_r\right), \tag{1.2}$$

где коэффициент трансформации:

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

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

$$I_r = I_s e^{j\psi}. \tag{1.3}$$

Тогда выражение для токов вторичной обмотки (1.2) фазорегулирующего трансформатора приобретает вид:

$$I_{2q} = \frac{1+e^{j\psi}}{2k_q} I_s = \frac{1}{k_q} cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \tag{1.4}$$

Модуль этого тока

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

Здесь и в дальнейшем учитывается, что ток I_s совмещен с осью действительных значений. Это позволяет выразить через него все токи в других элементах схемы фазорегулирующего трансформатора. Далее определяется характер изменения токов в обмотках намагничивающего трансформаторного элемента. Для узла «n» системы обмоток низкого напряжения:

$$aI_{2q} = I_{2p} + a^2 I_{2q}, \tag{1.5}$$

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

С учетом ранее установленного соотношения для тока I_{2q} (1.4) получаем:

$$I_{2p} = j\frac{\sqrt{3}}{k_q} cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \tag{1.6}$$

Модуль этого тока изменяется в соответствии с равенством:

$$\left|I_{2p}\right| = \frac{\sqrt{3}}{k_q} cos\frac{\psi}{2} I_s.$$

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

$$I_{1p} = I_r - I_s = \left(e^{j\psi} - 1\right) I_s = j2\,sin\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \tag{1.7}$$

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

Коэффициент трансформации намагничивающего трансформаторного элемента является переменной величиной, которая при изменении взаимного расположения регулировочных контактов S_1 и S_2 может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Данная переменная величина представлена следующим образом:

$$k_{pf} = k_y k_p , \tag{1.8}$$

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

$k_p = \dfrac{W_{2p}}{W_{1p}}$ – полное соотношение числа витков вторичной обмотки этого элемента относительно первичной,

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

Тогда с учетом представленных выше значений токов I_{1p} и I_{2p} (1.6,1.7):

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

или

$$tg\frac{\psi}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{k_p}{k_q} k_y = tg\frac{\psi_{max}}{2} k_y , \tag{1.9}$$

где

$$tg\frac{\psi_{max}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{k_p}{k_q}.$$

Данное соотношение (1.9) устанавливает связь между k_q и k_p при заданных ψ_{max} и k_p и, таким образом, максимальный фазовый сдвиг определяется величинами k_p и k_q, а текущее значение угла ψ – значением k_y:

$$k_y = \frac{tg\dfrac{\psi}{2}}{tg\dfrac{\psi_{max}}{2}}. \tag{1.10}$$

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

$$I_{1p} = I_r - I_s , \qquad I_{2q} = \frac{1}{2k_q}\left(I_s + I_r\right),$$

$$I_{2p} = j\sqrt{3} I_{2q} = j\frac{\sqrt{3}}{2k_q}\left(I_s + I_r\right), \tag{1.11}$$

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

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

$$I_r = \frac{1 + jk_y tg\frac{\psi_{max}}{2}}{1 - jk_y tg\frac{\psi_{max}}{2}} I_s = \dot{K} I_s . \qquad (1.12)$$

Комплексный коэффициент преобразования $\dot{K}$ из (1.12) с разделением на действительную и мнимую составляющие:

$$\dot{K} = cos\psi + j\,sin\psi = \frac{1 - k_y^2 tg^2\frac{\psi_{max}}{2}}{1 + k_y^2 tg^2\frac{\psi_{max}}{2}} + j\frac{2k_y tg\frac{\psi_{max}}{2}}{1 + k_y^2 tg^2\frac{\psi_{max}}{2}} . \qquad (1.13)$$

Мнимая составляющая $(j\,sin\psi)$ этого коэффициента является нечетной функцией угла ψ и определяет связь между коэффициентом k_y и углом ψ:

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

Выражая это равенство относительно k_y, приходим к результату:

$$k_y = \frac{tg\frac{\psi}{2}}{tg\frac{\psi_{max}}{2}} . \qquad (1.14)$$

Выражение (1.14) совпадает с ранее полученным выражением связи между текущими значениями угла ψ и k_y (1.10), что подтверждает корректность выполненных преобразований. Выше отмечалось, что одна из особенностей трансформаторного фазорегулирующего устройства состоит в том, что закон преобразования токов, осуществляемый устройством, полностью соответствует закону преобразования напряжений.

На рис.1.14 изображена векторная диаграмма напряжений, позволившая дать простейшее описание закона преобразования напряжений.

В соответствии с данной векторной диаграммой напряжение U_{1p} в точке «m» схемы соединения обмоток (рис.1.13) в процессе регулирования изменяется следующим образом:

$$U_{1p} = U_s cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} . \qquad (1.15)$$

Напряжение U_{2p}, можно записать как:

$$U_{2p} = k_{pf} U_{1p} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_y k_q tg\frac{\psi_{max}}{2} cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s . \qquad (1.16)$$

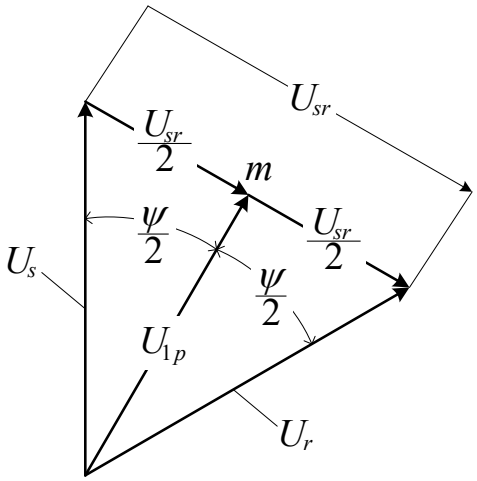


Рис.1.14. Векторная диаграмма напряжений

Значение $k_{pf} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_y k_q tg\frac{\psi}{2}$ получено ранее в (1.8) при рассмотрении связи между токами I_s и I_r. Зная U_{2p}, можно выразить значение U_{2q}:

$$U_{2q} = j\sqrt{3}U_{2p} = jk_y k_q tg\frac{\psi_{max}}{2} cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s . \qquad (1.17)$$

С другой стороны

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

где U_{sr} напряжение между соответствующими входными (U_s) и выходными (U_r) контактами устройства. С учетом выше изложенного, выражение для напряжения U_{sr} приобретает вид:

$$U_{sr} = j2 cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} k_y tg\frac{\psi_{max}}{2} U_s . \qquad (1.18)$$

Из векторной диаграммы рис.1.14 также следует:

$$U_s + U_r = 2 cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s .$$

Тогда:

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

В свою очередь:

$$U_r = U_s + U_{sr} = U_s + j(U_s + U_r) k_y tg\frac{\psi_{max}}{2},$$

или

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

Выражая U_r через U_s, можно прийти к результату:

$$U_r = \frac{1 + jk_y tg\frac{\psi_{max}}{2}}{1 - jk_y tg\frac{\psi_{max}}{2}} U_s = \dot{K} U_s . \tag{1.19}$$

Это означает, что коэффициент преобразования по току (1.12) полностью соответствует коэффициенту преобразования по напряжению (1.19). Выполненный анализ дает возможность представить закономерности изменения токов и напряжений в элементах фазорегулирующего трансформатора.

Для возбуждающего элемента:

$$\begin{gathered} I_{1p} = 2\sin\frac{\psi}{2} I_s , U_{1p} = \cos\frac{\psi}{2} U_s , \\ I_{2p} = \frac{\sqrt{3}}{k_q}\cos\frac{\psi}{2} I_s , U_{2p} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \sin\frac{\psi}{2} U_s . \end{gathered} \tag{1.20}$$

Для фазосдвигающего элемента:

$$I_{1q} = I_s , U_{1q} = 2\sin\frac{\psi}{2} U_s , \tag{1.21}$$

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

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

$$S_p = \frac{U_{1p(max)} I_{1p(max)} + U_{2p(max)} I_{2p(max)}}{2} = \frac{2U_s I_s \sin\frac{\psi_{max}}{2} + 2U_s I_s \sin\frac{\psi_{max}}{2}}{2} = 2U_s I_s \sin\frac{\psi_{max}}{2} . \tag{1.22}$$

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

$$S_q = \frac{U_{1q(max)} I_{1q(max)} + U_{2q(max)} I_{2q(max)}}{2} = \frac{2U_s I_s \sin\frac{\psi_{max}}{2} + 2U_s I_s \sin\frac{\psi_{max}}{2}}{2} = 2U_s I_s \sin\frac{\psi_{max}}{2}. \quad (1.23)$$

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

$$S_{ФРТ} = S_p + S_q = 4U_s I_s \sin\frac{\psi_{max}}{2}. \quad (1.24)$$

Режимные характеристики устройства

На основе принципиальной схемы рис.1.13 была создана комплексная структурно-имитационная модель устройства, позволившая провести расчетные эксперименты с возможностью измерения всех необходимых для анализа режимных параметров во всех элементах устройства. Для удобства проведения расчетных экспериментов каждый из трансформаторов устройства был представлен в модели в виде группы однофазных трансформаторов. Параметры каждого элемента были определены исходя из $U_s = U_r = 230B$ и номинального тока нагрузки $I_r = 12A$. Регулирование фазового сдвига ψ выходного напряжения U_r относительно напряжения на входе U_S осуществлялось с помощью силовых ключей. На модели были проведены ряд расчетных экспериментов, таких как опыт холостого хода, короткого замыкания, а также нагрузочные испытания, которые позволили определить энергетические характеристики устройства (Приложение 1). Для верификации выражений, полученных выше, по результатам расчетных экспериментов были построены сравнительные характеристики рис.1.15÷1.17.

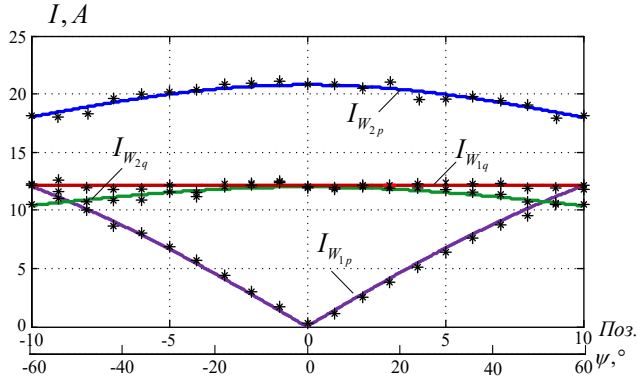


Рис.1.15. Характеристики токов в элементах устройства

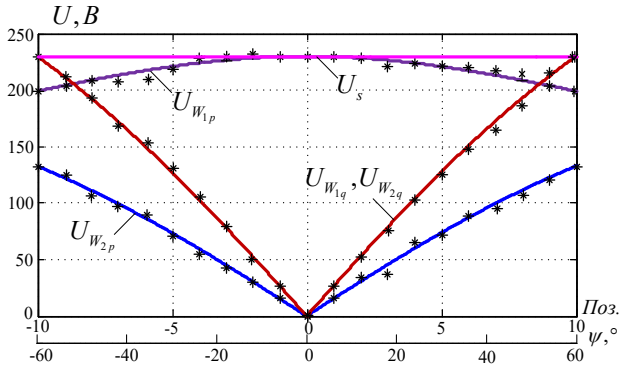


Рис.1.16.Характеристики напряжений на элементах устройства

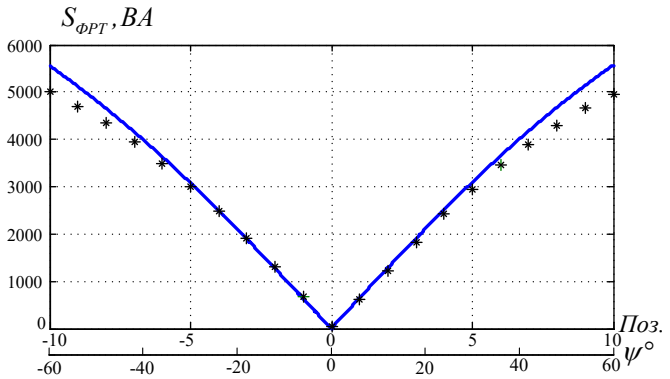


Рис.1.17. Характеристики мощности устройства

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

Сравнительный анализ рис.1.15÷1.17 подтверждает совпадение результатов, полученных как при применении аналитических выражений, так и с помощью Simulink-моделей.

1.4 «Однотрансформаторное фазорегулирующее устройство с регулированием в нейтрали»

Схема и описание фазорегулирующего трансформатора

Устройство представляет собой трехфазный трехобмоточный трансформатор (рис.1.18), содержащий трехфазные системы первичных (W_1) и вторичных (W_2) обмоток, а также трехфазную систему обмоток управления (W_3) с регулировочными ответвлениями, которые переключаются с помощью заземленных контактов (P) механизма переключения под нагрузкой [19]. Устройство обеспечивает широкий диапазон регулирования угла фазового сдвига $\psi = \pm 120^\circ$. Переключатель регулировочных ответвлений размещен в нейтрали схемы соединения регулировочных обмоток, что приводит к отсутствию необходимости в специальной изоляционной защите корпуса регулятора.

Конструкция фазорегулирующего трансформатор позволяет значительно снизить его установленную мощность по сравнению с традиционными фазоповоротными трансформаторами, компактна, удобна для транспортировки, монтажа и обслуживания.

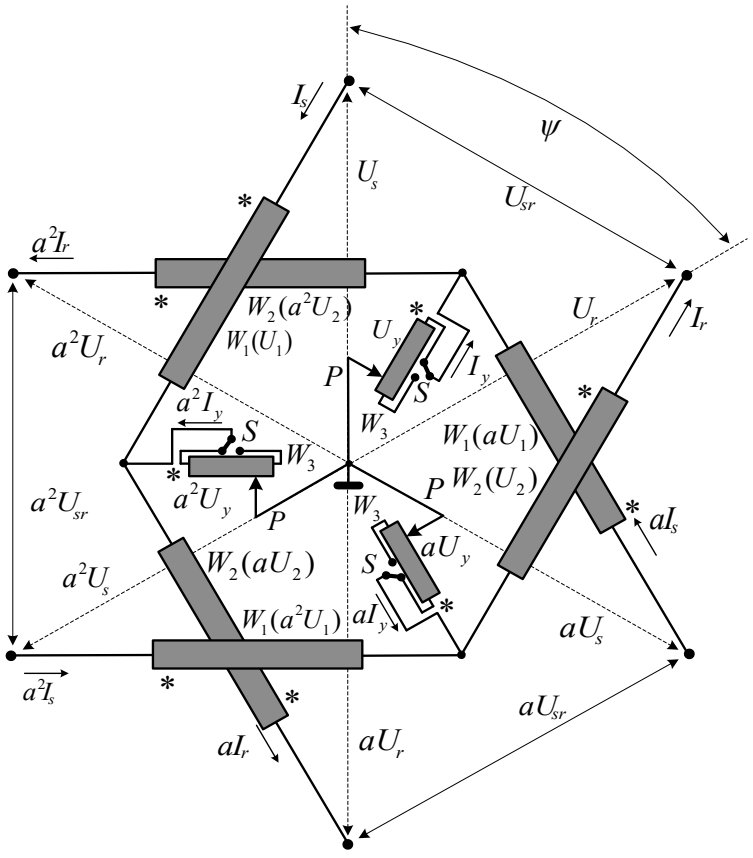


Рис.1.18. ФРТ, выполненный по «однотрансформаторной схеме с регулированием в нейтрали»

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

Математическая модель устройства

Математическая модель объекта исследования детально рассмотрена в [151,131]. Комплексный коэффициент преобразования фазорегулирующего трансформатора $(\dot{K})$ характеризует его состояние при любом положении контактов механизма переключения (P) и полностью определяет соответствующий этому положению электрический режим.

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

$$k_y = \frac{W_3}{W_1} = \frac{W_3}{W_2}, \tag{1.25}$$

где значение W_3 – число действующих (т.е. обтекаемых током) витков этой обмотки при различных положениях механизма переключения P. Величина k_y представлена в качестве независимой координаты управления. Комплексный коэффициент преобразования по напряжению определяется, исходя из векторной диаграммы напряжений (рис.1.19).

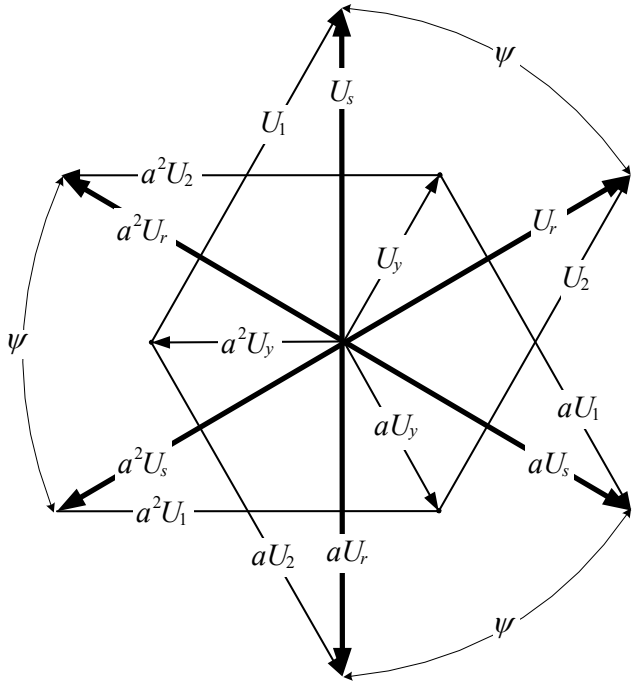


Рис.1.19. Векторная диаграмма напряжений

Учитывая, что $W_1 = W_2$, можно записать: $U_1 = U_2 = U$. При этом напряжение U_y на обмотке управления подчиняется условию: $U_y = k_y U$. Из векторной диаграммы рис.1.19. следует:

$$\begin{cases} U_s = U_1 + a^2 U_y = (1 + a^2 k_y) U \\ U_r = U_2 + a\, U_y = (1 + a\, k_y) U \end{cases}, \tag{1.26}$$

где a – комплексный оператор трехфазной системы

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

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

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

$$\dot{K} = \frac{1+a\ k_y}{1+a^2 k_y}. \tag{1.27}$$

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

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

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

Отсюда было значение I_y:

$$I_y = \frac{I_s - I_r}{k_y}.$$

Для узла, к которому подтекает ток I_y, можно записать:

$$I_y + aI_s = a^2 I_r \text{ или } \quad I_y = a^2 I_r - aI_s.$$

При этих условиях:

$$\frac{I_s - I_r}{k_y} = a^2 I_r - aI_s.$$

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

В конечном счете:

$$I_r = \frac{1+a\ k_y}{1+a^2 k_y} I_s. \tag{1.28}$$

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

$$\begin{Bmatrix} U_r & \cdot\cdot & U_s \\ I_r & = \dot{K} \cdot\cdot & I_s \end{Bmatrix}.$$

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

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

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

$$\frac{1 + a\ k_y}{1 + a^2 k_y} = \frac{(1 + a\ k_y)^2}{(1 + a\ k_y)(1 + a^2 k_y)} = \frac{(1 - k_y - \frac{k_y^2}{2}) + j\sqrt{3}(1 - \frac{k_y}{2})}{1 - k_y + k_y^2}. \qquad (1.29)$$

При этом:
$$\cos\psi = \frac{1 - k_y(1 + \frac{k_y}{2})}{1 - k_y + k_y^2}, \qquad \sin\psi = \frac{\sqrt{3}(1 - \frac{k_y}{2})k_y}{1 - k_y + k_y^2}.$$

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

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

Основными показателями нормального режима работы устройства являются изменяющиеся в процессе регулирования угла ψ токи и напряжения в элементах электрической схемы. Характер изменения этих величин определяет энергетические и стоимостные характеристики устройства. Одним из таких показателей является напряжение U_{sr} между входными и выходными клеммами устройства, Из схемы устройства рис.1.18 следует: $U_r = U_s + U_{sr}$. Тогда:

$$U_{sr} = U_r - U_s = \frac{1 + ak_y}{1 + a^2 k_y}U_s - U_s = \frac{(a - a^2)k_y}{1 + a^2 k_y}U_s = \frac{(a - a^2)(1 + ak_y)k_y}{(1 + a^2 k_y)(1 + ak_y)}U_s =$$

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

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

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

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

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

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

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

Соответственно напряжение на задействованной части обмотки управления U_y характеризуется соотношением:

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

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

– в зависимости от k_y

$$I_y = \frac{\frac{k_y}{2} + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}}}{\sqrt{1 - k_y + k_y^2}} I_s . \qquad (1.30)$$

– в зависимости от ψ

$$I_y = (\sqrt{3}\cos\frac{\psi}{2} + \sin\frac{\psi}{2})I_s . \qquad (1.31)$$

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

$$S_{PST} = \frac{|U_{s\,max}||I_{s\,max}| + |U_{y\,max}||I_{y\,max}| + |U_{r\,max}||I_{r\,max}|}{2} . \qquad (1.32)$$

Используя полученные ранее соотношения:

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

или

$$S_{PST} = (1 + \sin\frac{\psi}{2})(\cos\frac{\psi}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}}\sin\frac{\psi}{2})U_s I_s . \qquad (1.33)$$

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

Модифицированная система управления устройством

Недостаток схемы регулирования рассмотренного ФРТ рис.1.18 состоит в том, что при переводе переключателя S в противоположное положение, пределы регулирования угла фазового сдвига существенно сокращаются. Вариант схемы, обеспечивающей симметрию регулирования угла ψ в той и другой области, представлены на рис.1.20, векторная диаграмма напряжений на рис.1.21.

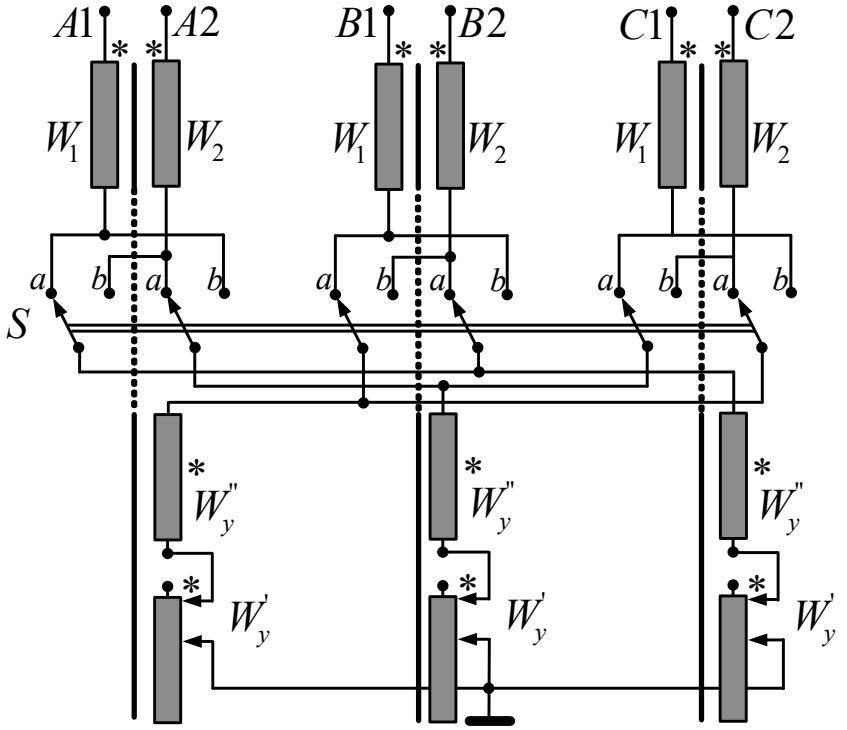


Рис.1.20. Схема регулирования угла ψ

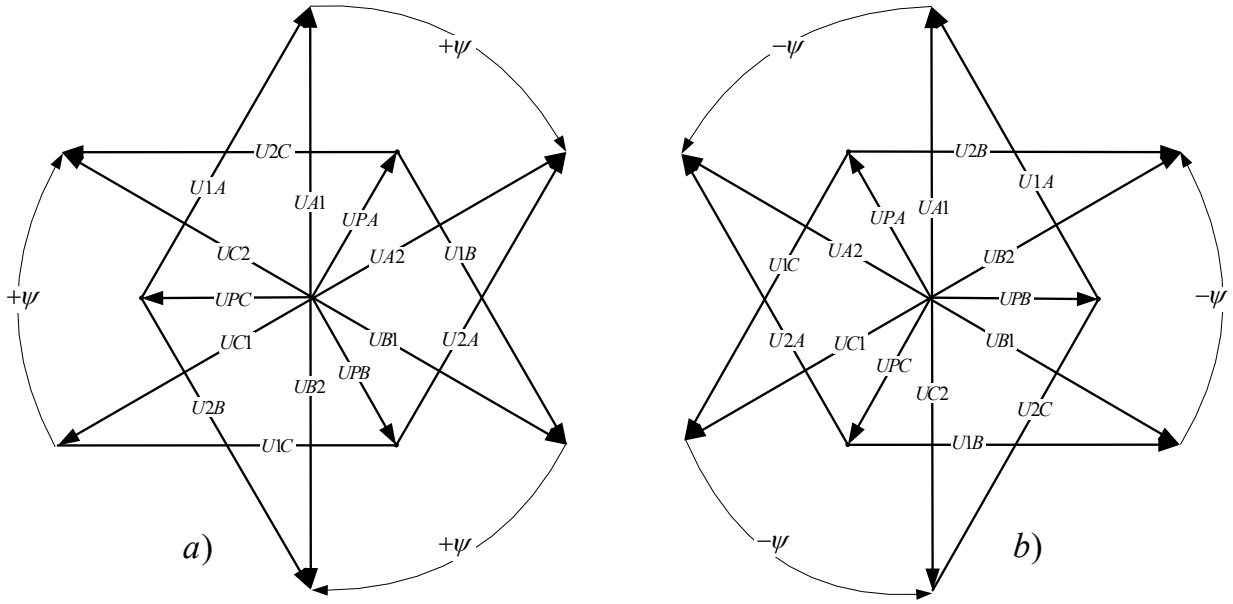


Рис.1.21. Векторные диаграммы напряжений при регулировании угла ψ (a) – в положительной области, (b) – в отрицательной области

Дополнительной особенностью схемы регулирования (рис.1.20) является разделение обмотки управления фазорегулирующего трансформатора на регулируемую W_y' и нерегулируемую W_y'' секции. Механизм переключения регулировочных ответвлений для

данного варианта содержит два встречно переключаемых контакта. Это приводит к существенному расширению пределов регулирования по углу ψ.

На рис.1.22 представлены графики изменения расчетной мощности фазорегулирующего трансформатора S_{PST} при изменении угла ψ в пределах $\pm 120^{\circ}$.

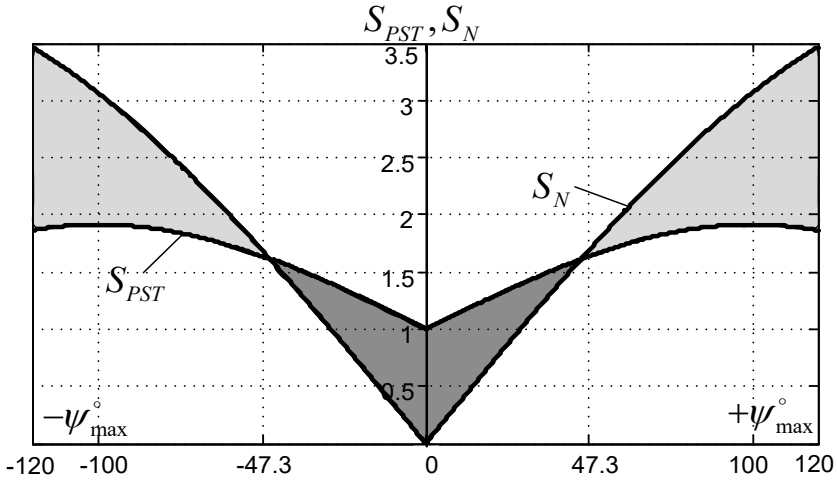


Рис.1.22. Графики изменения расчетной мощности фазорегулирующих устройств

Также, на рис.1.22 показаны графики изменения расчетной мощности S_N классического двухтрансформаторного варианта ФРТ. Анализ графиков $S_{PST}(\psi)$ и $S_N(\psi)$ доказывает эффективность применения фазорегулирующего трансформатора, выполненного по схеме "однотрансформаторный с регулированием в нейтрали" в диапазоне более ±50°.

Режимные характеристики устройства

На основе структурно-имитационной модели в среде Matlab/Simulink, для ФРТ (рис.1.18) были рассчитаны энергетические характеристики. На рис.1.23, для примера, представлены графики токов и напряжений в элементах устройства в режиме нагрузки. Линиями показаны характеристики, полученные на основе математической модели, а точками – при структурно-имитационном моделировании.

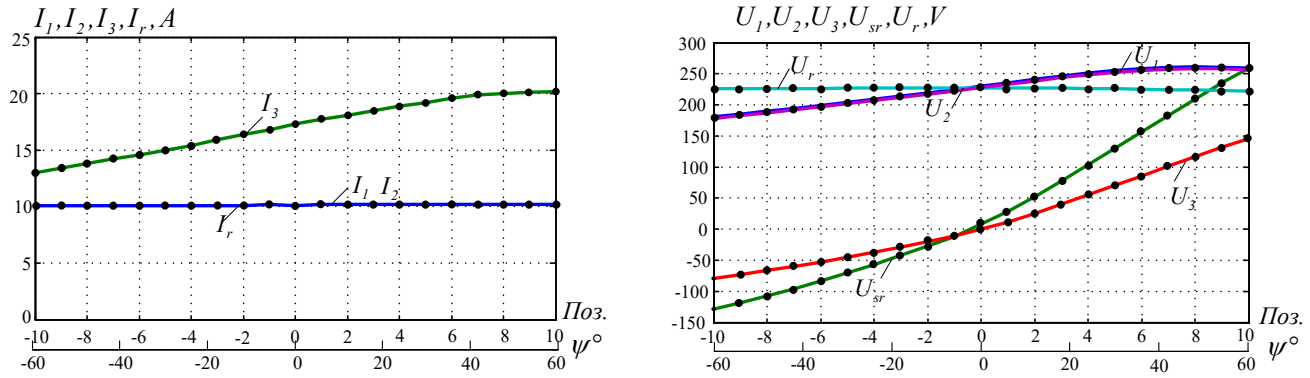


Рис.1.23. Графики токов и напряжений в элементах устройства, выполненного по схеме «однотрансформаторный с регулированием в нейтрали»

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

1.5. Фазорегулирующее устройство по схеме «треугольник»

Общая характеристика объекта исследования

На рис.1.24 и рис.1.25 представлена принципиальная схема фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме «треугольник», с нанесенной на нее информацией по напряжениям в характерных точках и распределением токов по обмоткам. [9]. Основными элементами устройства являются два силовых трансформатора, один из которых выполняет функции параллельного (или намагничивающего), другой – функции последовательного (или фазосдвигающего) элемента. Индексом «p» помечены обмотки и соответствующие электрические величины, характеризующие режим намагничивающего трансформатора, индексом «q» – обмотки и электрические величины фазосдвигающего трансформатора. Обмотка высокого напряжения фазосдвигающего трансформатора W_{1q} имеет среднюю точку «m», к которой подключены высоковольтные выводы обмоток W_{1p} намагничивающего трансформатора, соединенные в треугольник. Такой вариант включения способствовал стабильности выходного напряжения в процессе регулирования угла ψ.

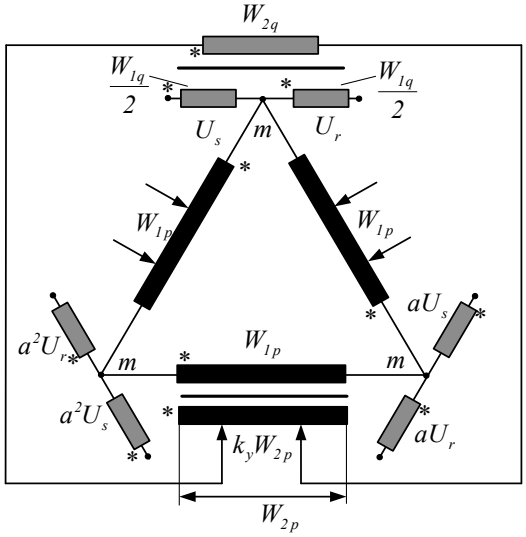


Рис.1.24. Схема ФРТ, выполненного по схеме «треугольник»

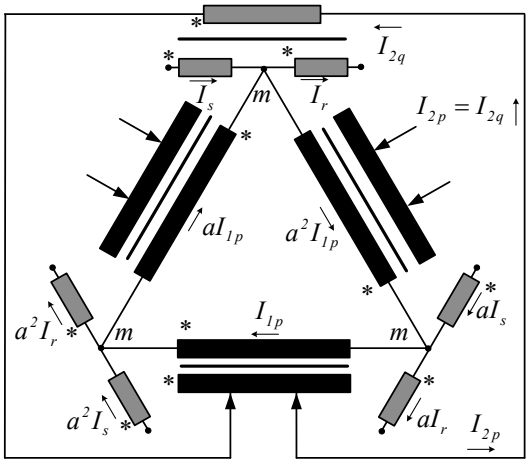


Рис.1.25. Распределение токов по обмоткам устройства

Изменение угла фазового сдвига между входом U_s и выходом U_r устройства осуществлялось путем взаимного перемещения регулировочных контактов на обмотке низкого напряжения W_{2p}. Благодаря модификации управление углом фазового сдвига вынесено на низкое напряжение. Это позволяет существенно снизить затраты на изоляцию регулировочной обмотки, и делает возможным использование предлагаемого устройства в сетях с высоким номинальным напряжением.

Математическая модель устройства

Исходя из рис.1.24,1.25 можно записать уравнение электромагнитного баланса фазосдвигающего трансформатора:

$$I_s \frac{W_{1q}}{2} + I_r \frac{W_{1q}}{2} = I_{2q} W_{2q}. \tag{1.34}$$

Ток вторичной обмотки фазосдвигающего элемента согласно (1.34):

$$I_{2q} = \frac{I_s + I_r}{2k_q}, \tag{1.35}$$

где k_q коэффициент трансформации:

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

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

$$I_r = I_s e^{j\psi}. \tag{1.36}$$

Следовательно, выражение для токов вторичной обмотки (1.35) фазорегулирующего трансформатора:

$$I_{2q} = \frac{1 + e^{j\psi}}{2k_q} I_s, \qquad \text{или} \qquad I_{2q} = \frac{\cos\frac{\psi}{2}}{k_q} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \tag{1.37}$$

Модуль тока во вторичной обмотке фазосдвигающего элемента, учитывая (1.37), описывается соотношением:

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

Для узла "m" системы обмоток высокого напряжения можно записать:

$$I_s + aI_{1p} = I_r + a^2 I_{1p}.$$

Отсюда, выражение для тока первичной обмотки намагничивающего элемента принимает вид:

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

Указанные соотношения с учетом (1.36):

$$I_{1p} = j\frac{I_s - I_r}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \tag{1.38}$$

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

$$I_{2p} = I_{2q} = \frac{I_s + I_r}{2k_q} = \frac{\cos\frac{\psi}{2}}{k_q} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \tag{1.39}$$

Коэффициент трансформации намагничивающего элемента (k_{pf}):

$$k_{pf} = k_y k_p = \frac{I_{1p}}{I_{2p}} = j\frac{2}{\sqrt{3}} k_q \frac{I_s - I_r}{I_s + I_r} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q tg\frac{\psi}{2}. \qquad (1.40)$$

Отсюда

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

При $k_y = 1$ получаем:

$$tg\frac{\psi_{max}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{k_p}{k_q} \qquad \text{или} \qquad k_p = \frac{2}{\sqrt{3}} tg\frac{\psi_{max}}{2} \cdot k_q.$$

Из соотношения (1.40) также следует:

$$j\frac{I_s - I_r}{I_s + I_r} = tg\frac{\psi}{2}.$$

Отсюда связь между выходным I_r и входным I_s токами рассмотренного устройства:

$$I_r = \frac{1 + jk_y tg\frac{\psi_{max}}{2}}{1 - jk_y tg\frac{\psi_{max}}{2}} I_s. \qquad (1.41)$$

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

$$\dot{K} = \frac{1 + jk_y tg\frac{\psi_{max}}{2}}{1 - jk_y tg\frac{\psi_{max}}{2}}. \qquad (1.42)$$

Векторные диаграммы токов, поясняющие работу фазорегулирующего устройства, при характерных значениях углов фазового сдвига $\psi = 30^\circ$ и $\psi = 60^\circ$ приведены на рис.1.26,1.27 соответственно.

Напряжение в узле «m»:

$$U_m = U_s \cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}}. \qquad (1.43)$$

С учетом (1.43) напряжение на первичной обмотке намагничивающего элемента:

$$U_{1p} = -j\sqrt{3}U_m = -j\sqrt{3}\cos\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s, \qquad (1.44)$$

а его модуль:

$$\left|U_{1p}\right| = \sqrt{3}\cos\frac{\psi}{2}U_s. \tag{1.45}$$

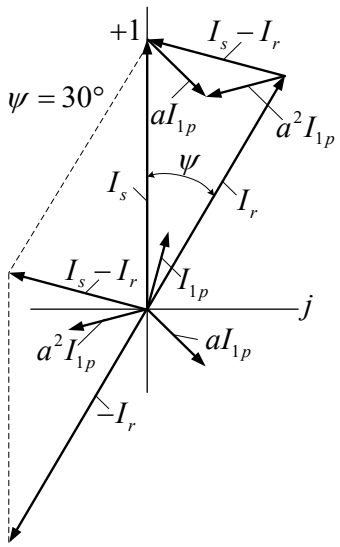


Рис.1.26. Векторная диаграмма токов при угле фазового сдвига $\psi = 30^\circ$

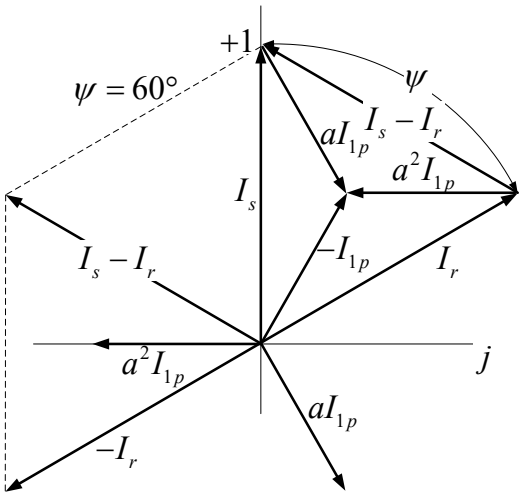


Рис.1.27. Векторная диаграмма токов при угле фазового сдвига $\psi = 60^\circ$

Напряжение на вторичной обмотке намагничивающего элемента:

$$U_{2p} = k_y k_p U_{1p} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q tg\frac{\psi}{2} U_{1p} = -jk_q \sin\frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s. \tag{1.46}$$

Модули напряжений вторичных обмоток устройства и первичной обмотки фазосдвигающего элемента:

$$\left|U_{2p}\right| = 2k_q \sin\frac{\psi}{2} U_s, \tag{1.47}$$

$$\left|U_{2q}\right| = \left|U_{2p}\right| = 2k_q \sin\frac{\psi}{2} U_s, \tag{1.48}$$

$$\left|U_{1q}\right| = \frac{\left|U_{2q}\right|}{k_q} = 2\sin\frac{\psi}{2} U_s. \tag{1.49}$$

Характер изменения модулей токов в обмотках
– возбуждающего элемента:

$$\left|I_{1p}\right| = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\frac{\psi}{2} I_s, \quad \left|I_{2p}\right| = \frac{\cos\frac{\psi}{2}}{k_q} I_s,$$

– фазосдвигающего элемента:

$$\left|I_{1q}\right| = I_s, \quad \left|I_{2q}\right| = \frac{\cos\frac{\psi}{2}}{k_q} I_s.$$

Для определения расчетной мощности ФРТ использованы выражения, аналогичные (1.32), записанные для соответствующих токов и напряжений:
– для возбуждающего элемента ФРТ:

$$S_p = \frac{\left|U_{1p(max)}\right|\left|I_{1p(max)}\right| + \left|U_{2p(max)}\right|\left|I_{2p(max)}\right|}{2},$$

– для фазосдвигающего элемента:

$$S_q = \frac{\left|U_{1q(max)}\right|\left|I_{1q(max)}\right| + \left|U_{2q(max)}\right|\left|I_{2q(max)}\right|}{2}.$$

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

Режимные характеристики устройства

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

На рис.1.28 представлены графики токов и напряжений в элементах устройства в нагрузочном режиме. Линиями показаны характеристики, полученные на основе математической модели, а звездочками - приструктурно-имитационномоделировании.

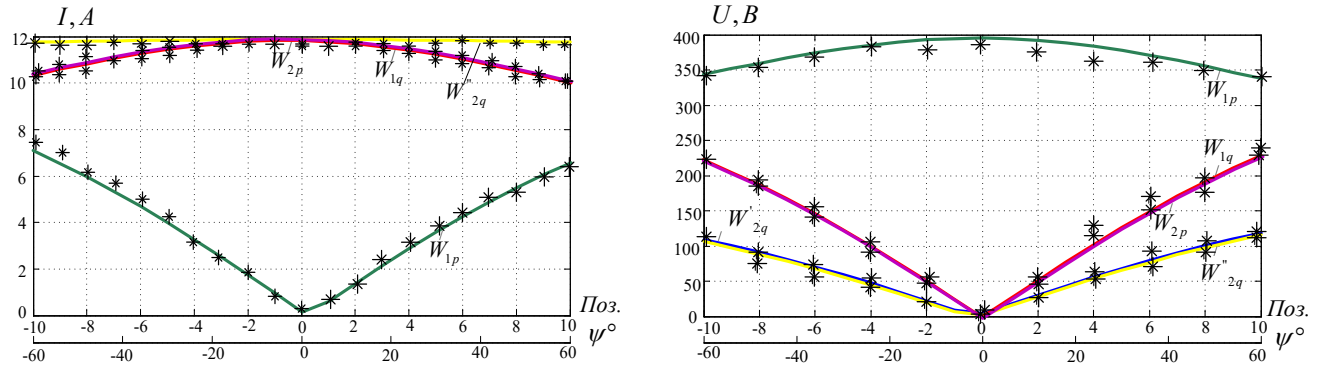


Рис.1.28. Графики токов и напряжений в элементах устройства, выполненного по схеме «треугольник»

Сравнительный анализ режимных характеристик полученных, как при математическом, так и при структурно–имитационном моделировании, показывает близость полученных результатов. На основании результатов сравнительного анализа п.1.3÷1.5 принято решение применять структурно–имитационное моделирование в качестве основного метода для исследования рассматриваемых далее схемных вариантов ФРТ.

1.6.Фазорегулирующее устройствопо схеме «модифицированный треугольник»

Принципиальная схема фазорегулирующего устройства с обозначением обмоток, напряжениями в характерных точках и распределением токов по обмоткам, представлена на рис.1.29 [113].

Для обеспечения регулирования угла фазового сдвига в диапазоне от 0° до 60° для данного устройства применен закон управления силовыми ключами, представленный на рис.1.8. Схема секционирования обмотки управления, приведена на рис.1.7.

Тестирование исследуемого ФРТ в режимах холостого хода и короткого замыкания (Приложение 4) позволили определить режимные и энергетические характеристики устройства в процессе регулирования. Для примера характеристики активной и реактивной составляющих сопротивления холостого хода и короткого замыкания схемы замещения приведены соответственно на рис.1.30,1.31.

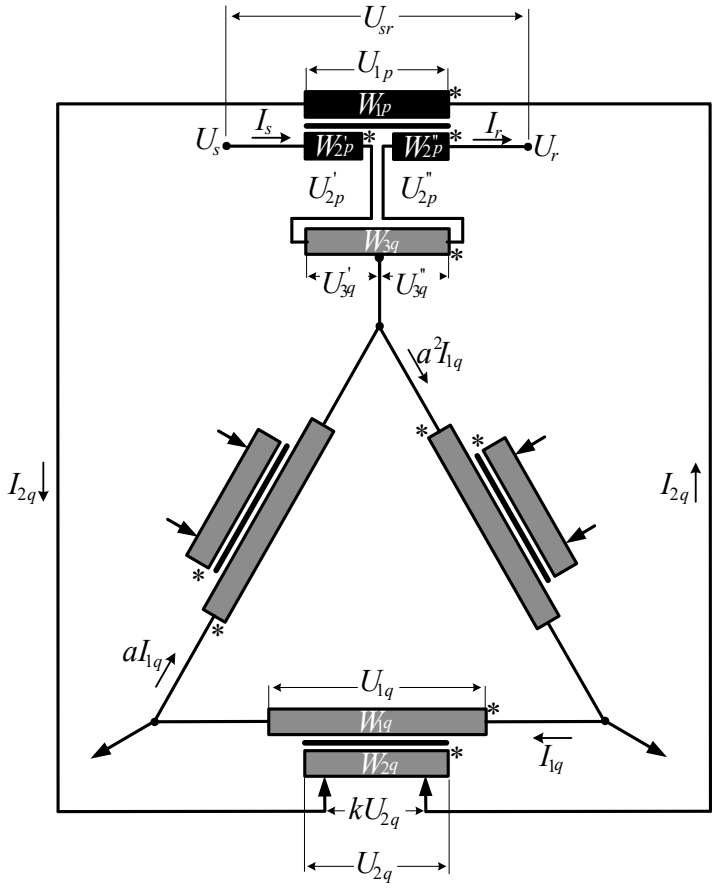


Рис.1.29. Принципиальная схема ФРТ по схеме «модифицированный треугольник»

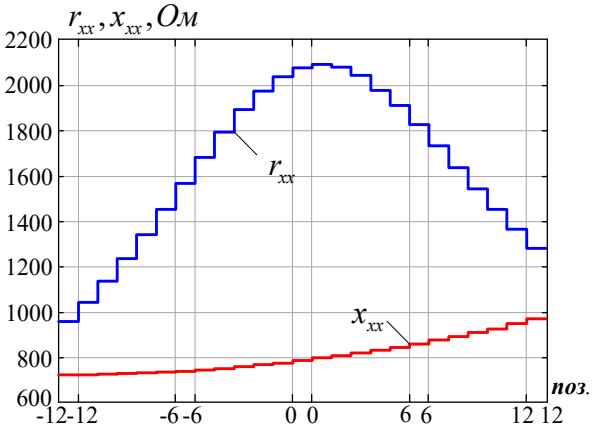


Рис.1.30. Характеристики активной r_{xx} и реактивной x_{xx} составляющих сопротивления холостого хода

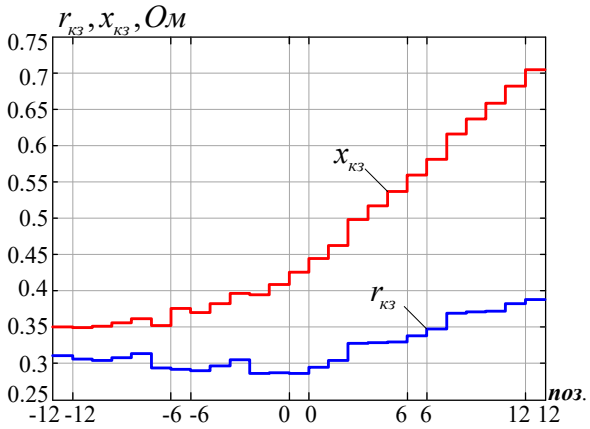


Рис.1.31. Характеристики активной $r_{кз}$ и реактивной $x_{кз}$ составляющих сопротивления короткого замыкания

Из рис.1.30. видно, как, ступенчато, изменяются зависимости активной и реактивной составляющей сопротивления ФРТ в режиме холостого хода. При изменении позиции - меняется угол фазового сдвига. Активная составляющая сопротивления ФРТ имеет максимум, при угле фазового сдвига около 30°. Минимальные значения активная составляющая ФРТ принимает при угле фазового сдвига равном 0° и 60°. Реактивная составляющая сопротивления ФРТ имеет минимум при угле фазового сдвига 0°, а максимум – при 60°.

Анализ характеристик реактивной и активной составляющих сопротивления короткого замыкания показал, что активная составляющая сопротивления $r_{кз}$ практически в 2 раза меньше реактивной составляющей $x_{кз}$. При увеличении угла фазового сдвига увеличивается сопротивление устройства. В этом случае напряжение ФРТ уменьшалось.

На рис.1.32 представлены характеристики потерь активной мощности в ФРТ.

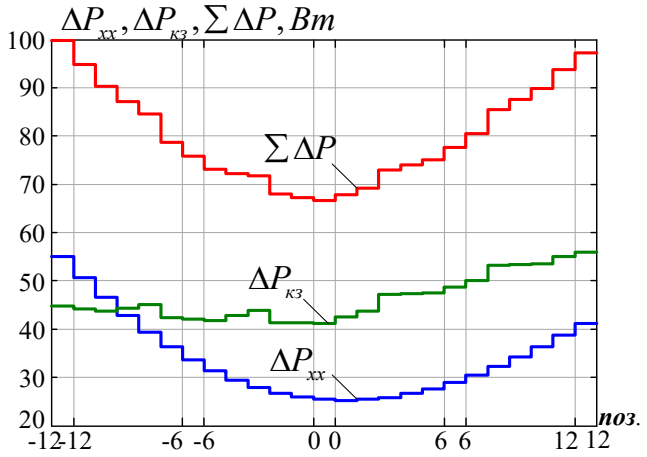


Рис.1.32. Зависимости изменения активных потерь от позиции переключения

где $\Delta P_{кз}$ – потери холостого хода; ΔP_{xx} – потери короткого замыкания; $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{кз} + \Delta P_{xx}$ – суммарные потери.

Следует отметить, что минимум активных потерь в ФРТ достигается при угле фазового сдвига 30°, а максимум либо при 0°, либо при 60°.

В процессе исследований также были проведены испытания ФРТ при работе на активную нагрузку (Приложение 4) при соблюдении условия $I_r = 12A = const$. Графики изменения напряжений и токов в процессе регулирования угла фазового сдвига (позиции) приведены соответственно на рис.1.33,1.34.

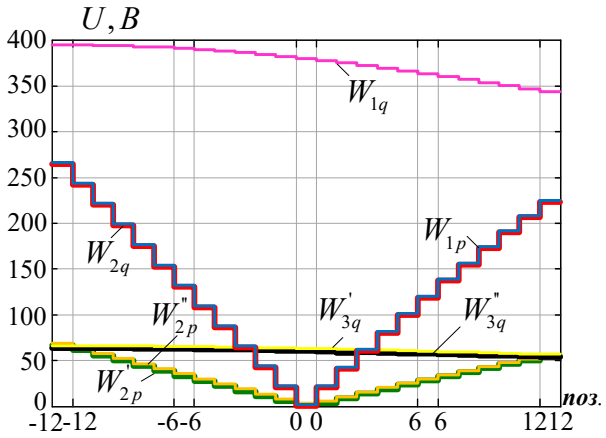


Рис.1.33. График изменения напряжения в элементах ФРТ

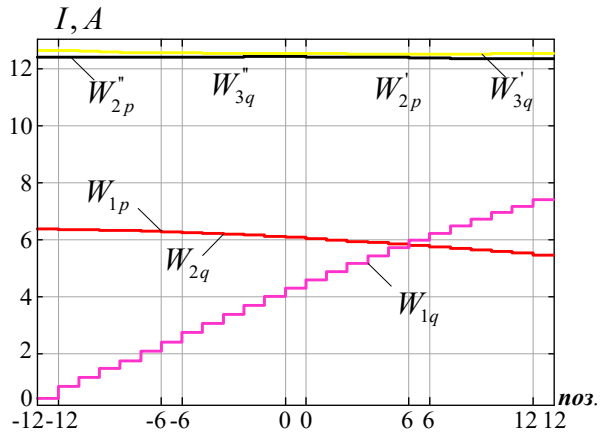


Рис.1.34. График изменения токов в элементах ФРТ

На обмотках W'_{2p} и W''_{2p} намагничивающего трансформатора напряжения приблизительно равны между собой. Та же ситуация прослеживалась для обмоток W'_{3q} и W''_{3q} фазосдвигающего трансформатора. На обмотках W_{1p} и W_{2q} значения напряжений приблизительно равны между собой. Максимальные значения напряжения на обмотках W_{1p}, W_{2q}, W'_{2p}, W''_{2p} наблюдаются при углах фазового сдвига, равных 0° и 60°. Но на обмотках W_{1q}, W'_{3q}, W''_{3q} напряжение достигает максимального значения при угле 0°.

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

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

Суммарная расчетная мощность элементов, образующих устройство, может быть значительно уменьшена за счет частичного перевода возбуждающего трансформатора в автотрансформаторный режим. Максимальный эффект достигается при условии, что одна половина проходной мощности передается автотрансформаторным путем, а вторая – чисто трансформаторным способом.

При этом расчетная мощность возбуждающего элемента остается такой же, как и для традиционного схемного варианта, а расчетная мощность добавочного элемента снижается практически в два раза. Таким образом, результирующий эффект снижения расчетной мощности всего агрегата составляет 25%. Двукратное снижение веса и габаритов добавочного трансформатора будет благоприятствовать размещению обоих элементов в одном общем трансформаторном баке, что следует считать наиболее предпочтительным конструктивным решением. Кроме того, частичное использование автотрансформаторного эффекта способствует снижению результирующего сопротивления короткого замыкания установки, а также потерь мощности в трансформаторных обмотках.

1.7.Фазорегулирующее устройство по схеме «инвертированный многоугольник»

Принципиальная схема фазорегулирующего устройства с обозначением обмоток, напряжениями в характерных точках и распределением токов по обмоткам устройства, представлена на рис.1.35.

Для обеспечения регулирования угла фазового сдвига в диапазоне от 0° до 60° использован закон управления силовыми ключами, представленный на рис.1.10. Схема секционирования обмотки управленияприведена на рис.1.9.

Как следует из схемы (рис.1.35), регулируемый фазовый сдвиг ψ между системами напряжений U_r и U_s создается путем суммирования напряжений двух, последовательно включенных, фазосдвигающих обмоток W_{1q} и, W_{1p} одна из которых принадлежит регулирующему трансформатору «q», другая – добавочному трансформатору «p». Встречное и поочередное перемещение регулирующих контактов трехфазной системы обмоток W_{3q} обеспечивает прямое регулирование напряжения U_{1p} высоковольтной обмотки W_{1p} добавочного трансформатора. При этом также происходит и, зависящее от величины регулируемого U_{1p}, а значит от величины регулируемого угла ψ, определенное изменение напряжений U_{2q} (высоковольтной обмотки W_{2q}) и U_{1q} (высоковольтной обмотки W_{1q}). Таким образом, в устройстве оптимизирована система управление углом фазового сдвига. Управление осуществляется на ½ обмотки (т.е. в 2 раза уменьшено количество положений переключения).

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

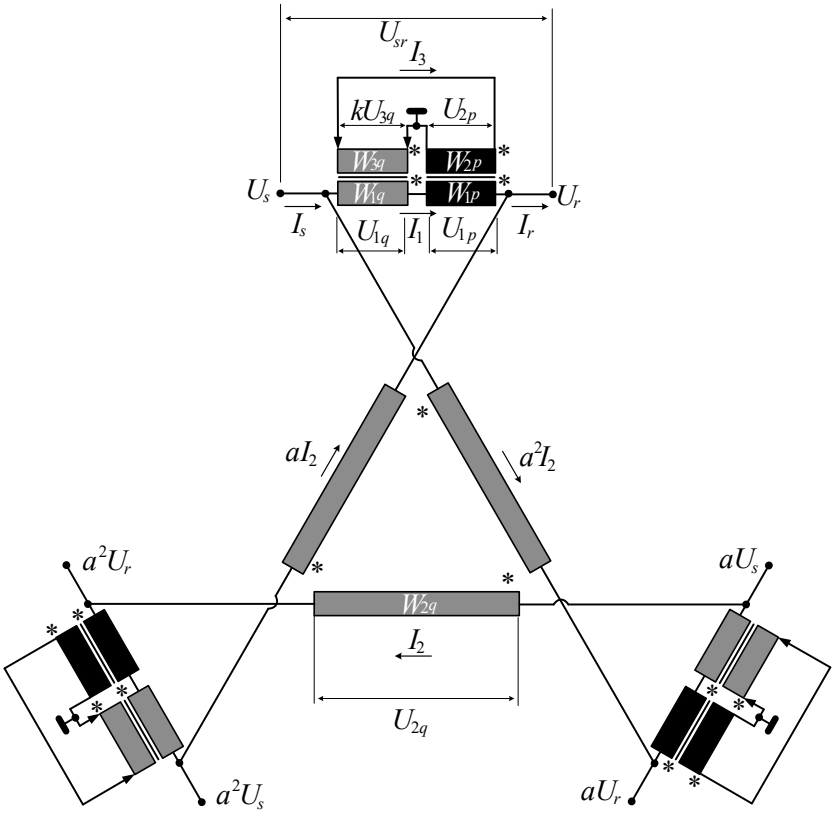


Рис.1.35. Принципиальная схема ФРТ, по схеме «инвертированный многоугольник»

На рис.1.36 представлены зависимости сопротивлений холостого хода от ступени регулирования (угла фазового сдвига). Характеристики активной $r_{кз}$ и реактивной $x_{кз}$ составляющих сопротивления короткого замыкания устройства $Z_{кз}$, представлены на рис.1.37.

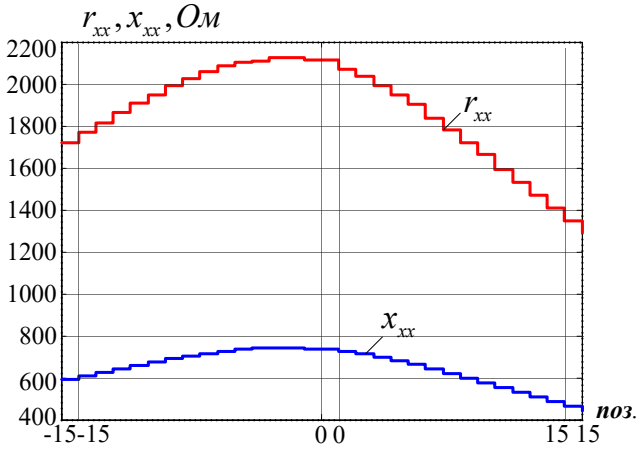


Рис.1.36. Характеристики активной r_{xx} и реактивной x_{xx} составляющих сопротивления ФРТ в режиме холостого хода

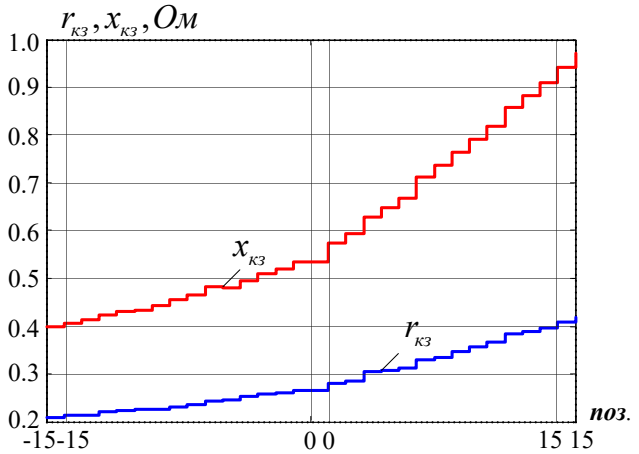


Рис.1.37. Характеристики активной $r_{кз}$ и реактивной $x_{кз}$ составляющих сопротивления короткого замыкания ФРТ

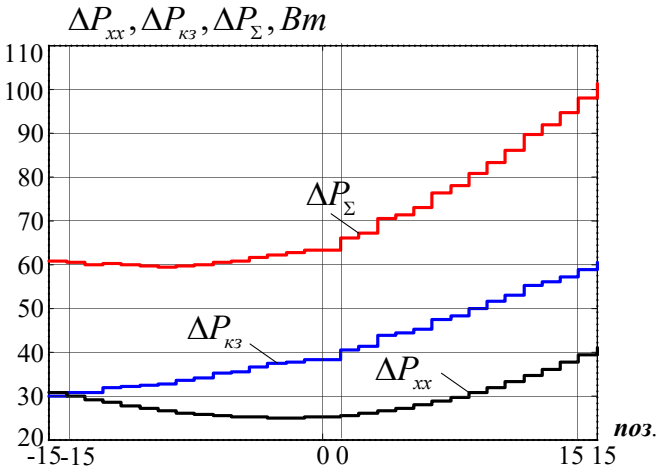


Рис.1.38. Зависимости изменения активных потерь от позиции

Эквивалентная зависимость $\Sigma\Delta P$ определялась как результат суммы активных потерь в режиме холостого хода и короткого замыкания (рис.1.38). Видно, что потери более активно растут с позиции 5 и далее.

Графики изменения напряжений и токов в процессе регулирования угла фазового сдвига (позиции) приведены соответственно на рис.1.39,1.40.

На рис.1.39 приведены характеристики изменения напряжения на обмотках ФРТ в режиме нагрузки. Видно, что максимальное напряжение фиксируется на обмотке W_{2q} и имеет тенденцию к росту (от 400 до 450В) в процессе регулирования угла фазового сдвига. Значения напряжения на обмотках W_{2p}, W_{3q} практически равны между собой.

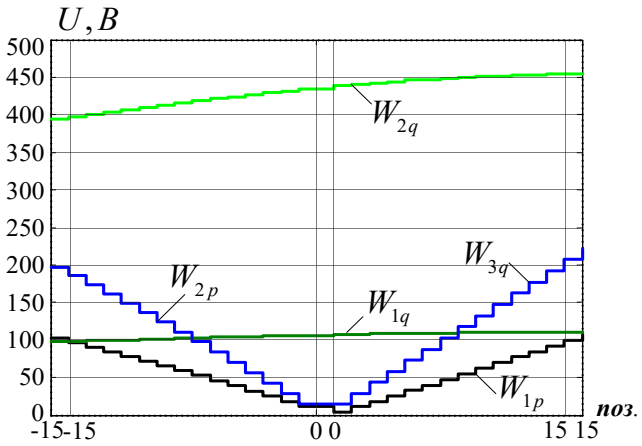


Рис.1.39.Кривые напряжений на обмотках ФРТ в режиме нагрузочных испытаний

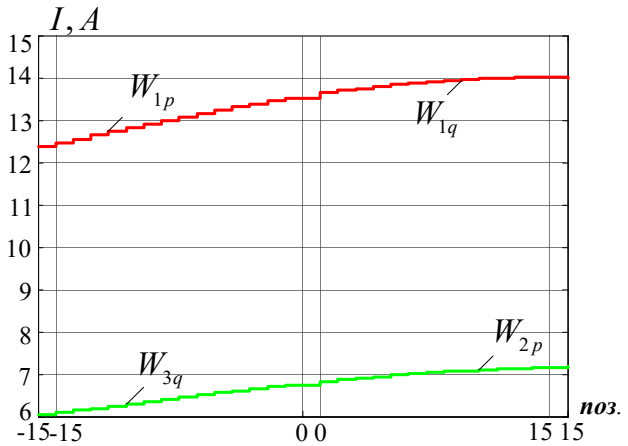


Рис.1.40.Зависимости токов в режиме нагрузочных испытаний при регулировании угла фазового сдвига (позиции)

Графики токов в обмотках устройства, реализованного по схеме «инвертированный многоугольник» в нагрузочном режиме представлены на рис.1.40.

При изучении характеристик (рис.1.40), видно, что токи на обмотках ФРТ близки для обмоток W_{1p}, W_{1q} и обмоток W_{3p}, W_{2p} и имеют тенденцию к росту в процессе регулирования.

1.8. Фазорегулирующее устройство по схеме «модифицированный многоугольник»

Принципиальная схема фазорегулирующего устройства, представлена на рис.1.41. Устройство подробно рассмотрено в [142].

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

регулирования угла фазового сдвига в диапазоне от 0° до 60° был разработан закон управления силовыми ключами, представленный на рис.1.6. Схема обмотки управления, приведена на рис.1.5. По результатам расчетных экспериментов, выполненных в среде Matlab/Simulink (Приложение 6), были получены энергетические характеристики ФРТ в процессе регулирования угла фазового сдвига ψ, значения которого определялось соответствующим положением силовых ключей, согласно закону переключения. Изменение параметров схемы замещения устройства, определенные в результате опыта холостого хода представлены на рис.1.42. Характеристики активной $r_{кз}$ и реактивной $x_{кз}$ составляющих сопротивления короткого замыкания устройства $Z_{кз}$, представлены на рис.1.43.

Анализ зависимостей рис.1.42 показал, что составляющие сопротивления холостого хода принимают максимальные значения при фазовом сдвиге $\psi = 30^{\circ}$ (нулевая позиция) и симметрично снижаются в процессе, как уменьшения, так и увеличения угла.

Анализируя полученные зависимости (рис.1.43) можно сделать вывод, что активная составляющая сопротивления короткого замыкания спадает по экспоненте при увеличении угла ψ, а минимальное значение реактивной составляющей приходится на угол $\psi = 30^{\circ}$. Максимальные же значения достигаются на границах диапазона регулирования.

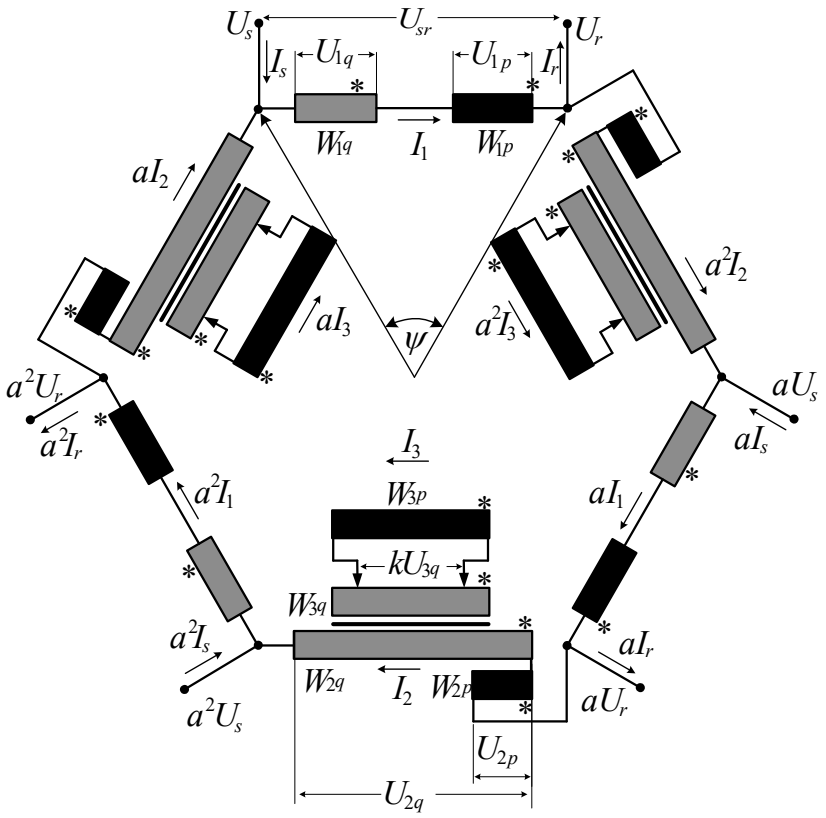


Рис.1.41. Принципиальная схема фазорегулирующего устройства, выполненного по схеме «модифицированный многоугольник»

В процессе исследования устройства по схеме «модифицированный многоугольник», проведены нагрузочные испытания с целью определения мощности всех элементов, входящих в его состав. Нагрузка при проведении эксперимента моделировалась активным сопротивлением $R_н = 19.1Ом$, обеспечивающим номинальный ток $I_r = 12A$. Характеристики изменения напряжений обмоток намагничивающего и фазосдвигающего трансформатора в процессе регулирования под нагрузкой представлены на рис.1.44. Графики изменения токов в обмотках устройства в нагрузочном режиме приведены на рис.1.45.

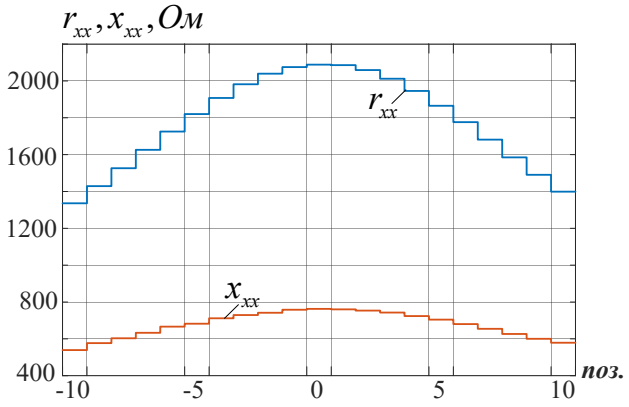


Рис.1.42. Характистики активной r_{xx} и реактивной x_{xx} составляющих сопротивления Z_{xx} ФРТ в режиме холостого хода

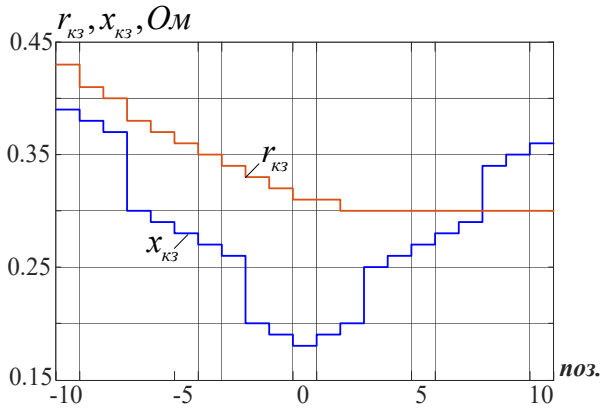


Рис.1.43. Характистики активной $r_{кз}$ и реактивной $x_{кз}$ составляющих сопротивления короткого замыкания $Z_{кз}$ ФРТ

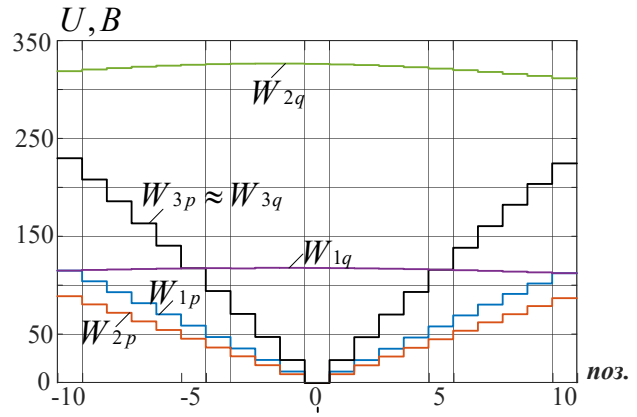


Рис.1.44. Зависимости изменения напряжений на обмотках ФРТ

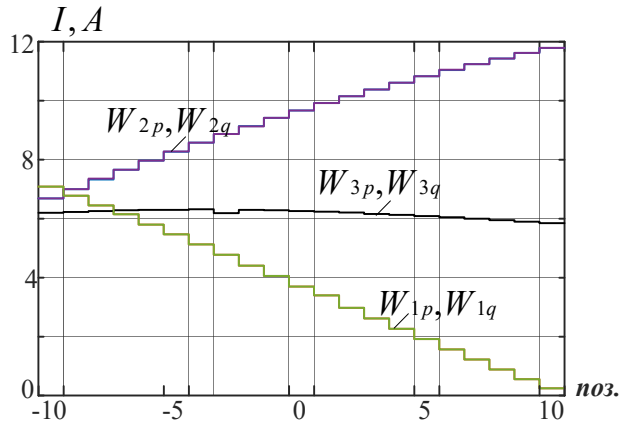


Рис.1.45. Зависимости изменения токов в режиме нагрузочных испытаний при регулировании угла фазового сдвига

Как видно из рис.1.44, напряжения на обмотках W_{2q} и W_{1q} в процессе регулирования угла практически не изменялись. Напряжение на остальных обмотках устройства менялось симметрично, принимая минимальные значения при $\psi = 30^{\circ}$ и максимальные значения при $\psi = 0^{\circ}$ и $\psi = 60^{\circ}$.

Анализ представленных графиков (рис.1.45) показал, что ток в обмотках W_{3p} и W_{3q} практически не менялся в процессе регулирования. При $\psi = 0^{\circ}$ токи в обмотках W_{2p}, W_{2q} и W_{1p}, W_{1q} приблизительно равны. При значении $\psi = 60^{\circ}$ в обмотках W_{2p} и W_{2q} ток достигал своего максимального значения, а в обмотках W_{1p} и W_{1q} – минимального.

На рис.1.46 приведены характеристики изменения потерь активной мощности, полученные в результате опытов холостого хода и короткого замыкания. Максимальные значения активных потерь имели место на границах диапазона регулирования.

В предложенном схемном варианте фазорегулирующего устройства, выполненном по схеме «модифицированный многоугольник», за счет подключения дополнительной обмотки W_{2p} намагничивающего трансформатора встречно с обмоткой W_{2q} фазосдвигающего

трансформатора, обеспечена возможность снижения величины магнитной индукции в стержне, а также повышение ее стабильности в процессе регулирования угла фазового сдвига.

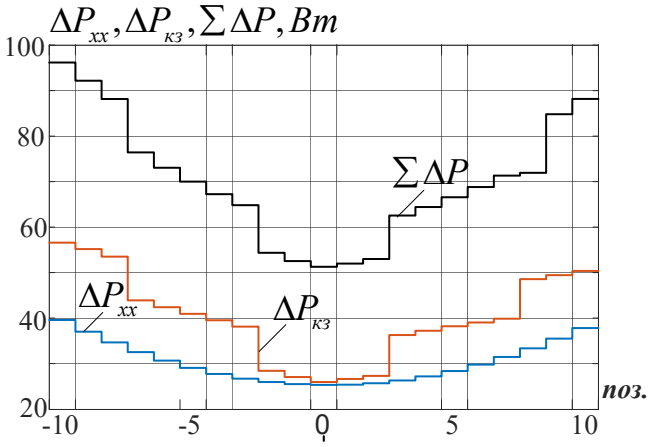


Рис.1.46. Зависимости изменения активных потерь в ФРТ выполненного по схеме «модифицированный многоугольник»

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

1.9.Фазорегулирующее устройства в «гексагональной» конфигурации

Принципиальная схема ФРТ, выполненного в «гексагональной» конфигурации, представлена на рис.1.47.

Основными частями устройства являются параллельный трансформатор (его обмотки помечены индексом « p »), и последовательный трансформатор (обмотки помечены индексом « q »). Входные электрические величины помечены индексом «s», выходные – индексом «r».

Схема обмотки управления W_{2q} при использовании силовых ключей приведена на рис.1.3. Благодаря модификации предложенного ФРТ мощность управления уменьшена примерно в два раза. Это стало возможным за счет применения смешанных схем управления автотрансформаторной и трансформаторной.

Регулирование угла фазового сдвига ψ между выходным U_r и входным напряжением U_s осуществлялось путём изменения состояний силовых ключей, согласно закону управления (рис.1.4), обеспечивающему диапазон изменения угла $\psi = 0^\circ \div 60^\circ$.

Модуль угла фазового сдвига ψ изменялся в зависимости от позиции переключения силовых ключей по закону, представленному на рис.1.48

Проведенные испытания исследуемого ФРТ (Приложение 7) в режимах холостого хода и короткого замыкания позволили определить характеристики устройства в процессе регулирования угла фазового сдвига графики, которых, приведены соответственно на рис.1.49, 1.50.

Анализ рис.1.49 показывает, что максимальное значение сопротивлений холостого хода достигают при фазовом сдвиге $\psi \approx 35 \div 37^\circ$, что соответствует восьмой позиции переключения. Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания $\left(x_{кз}\right)$ изменяется по параболическому закону и достигает минимума на шестой позиции, что соответствует $\psi \approx 26 \div 28^\circ$.

Активная составляющая сопротивления короткого замыкания $(r_{кз})$ (рис.1.50) изменяется по экспоненциальному закону, достигая минимальных значений на пятнадцатой позиции, что соответствует углу $\psi \approx 60^{\circ}$.

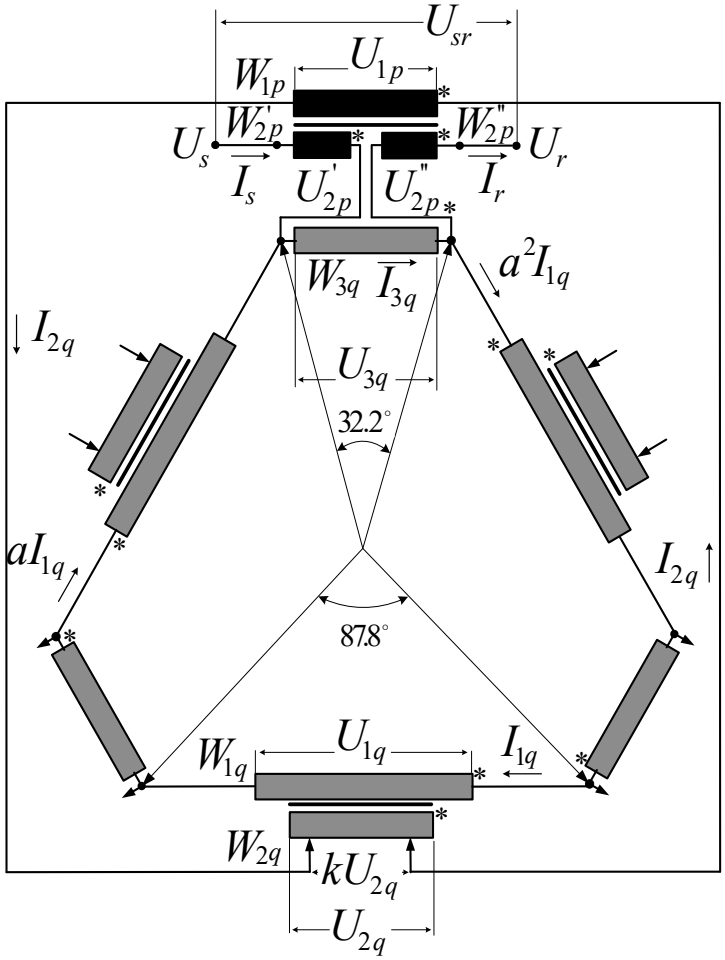


Рис.1.47.Принципиальная схема фазорегулирующего устройства, выполненного в «гексагональной» конфигурации

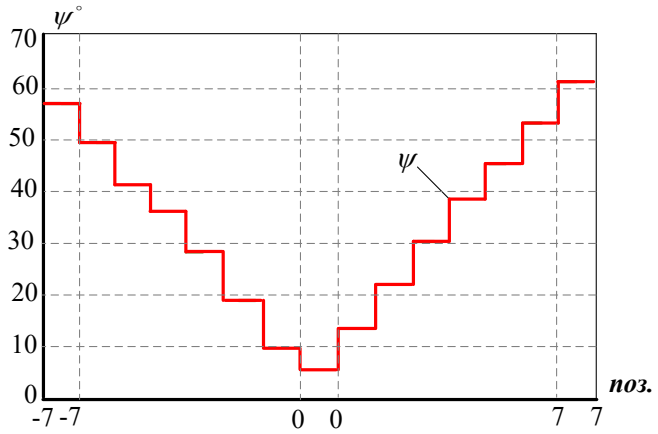


Рис.1.48. Зависимость угла фазового сдвига ψ от позиции переключения

В процессе исследований были также проведены испытания ФРТ при работе на активную нагрузку и соблюдении условия $I_r = 12\,A = const$. Графики изменения напряжений и токов в процессе регулирования приведены соответственно на рис.1.52,1.53.

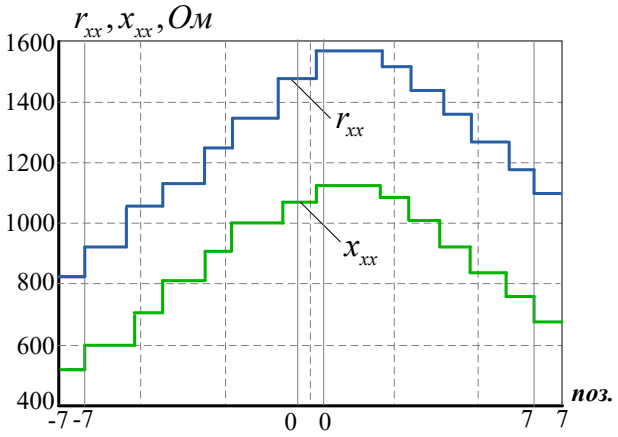


Рис.1.49. Характеристики активной r_{xx} и реактивной x_{xx} составляющих сопротивления холостого хода

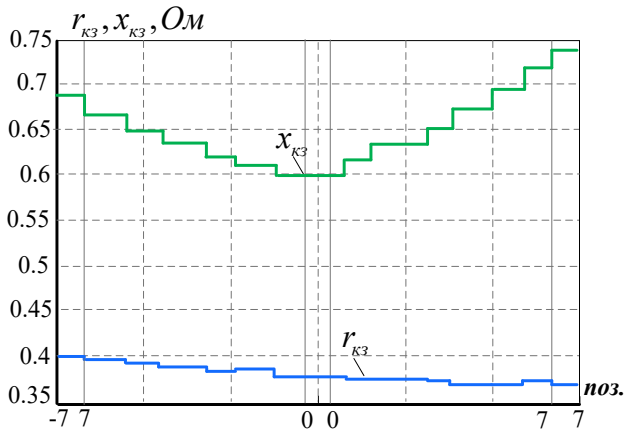


Рис.1.50. Характеристики активной $r_{кз}$ и реактивной $x_{кз}$ составляющих сопротивления короткого замыкания

На рис.1.51 представлены характеристики потерь активной мощности в ФРТ

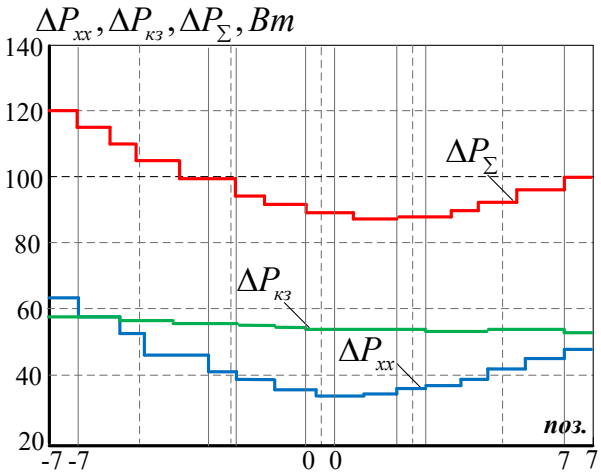


Рис.1.51. Зависимости изменения активных потерь от позиции переключения

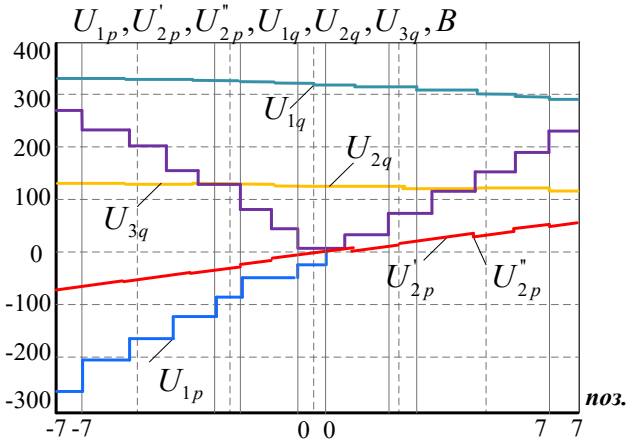


Рис.1.52. График изменения напряжения в элементах ФРТ

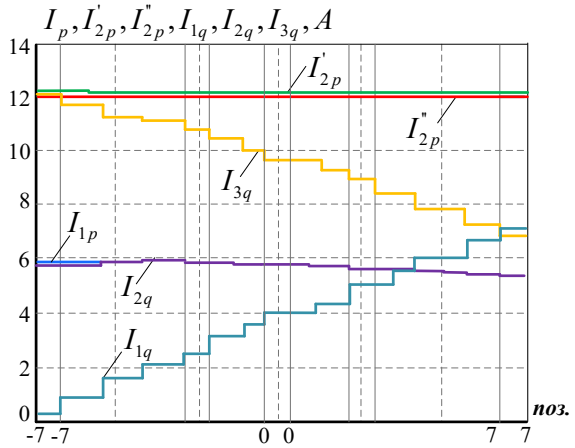


Рис.1.53. График изменения токов в элементах ФРТ

Предлагаемое техническое решение также обеспечивает существенное снижение установленной мощности оборудования по отношению к классическому варианту.

1.10.Сравнительный анализ энергетических характеристик различных схемных вариантов ФРТ

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

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

S_{PE}/S_r -коэффициент, характеризующий мощность управления, приведенные в табл. 1.1.

Для сравнительного анализа, результаты которого приведены на рис.1.54, были выбраны рассмотренные выше схемные варианты фазорегулирующих устройств:

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

Таблица 1.1. Сравнительные результаты исследования схем ФРТ

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

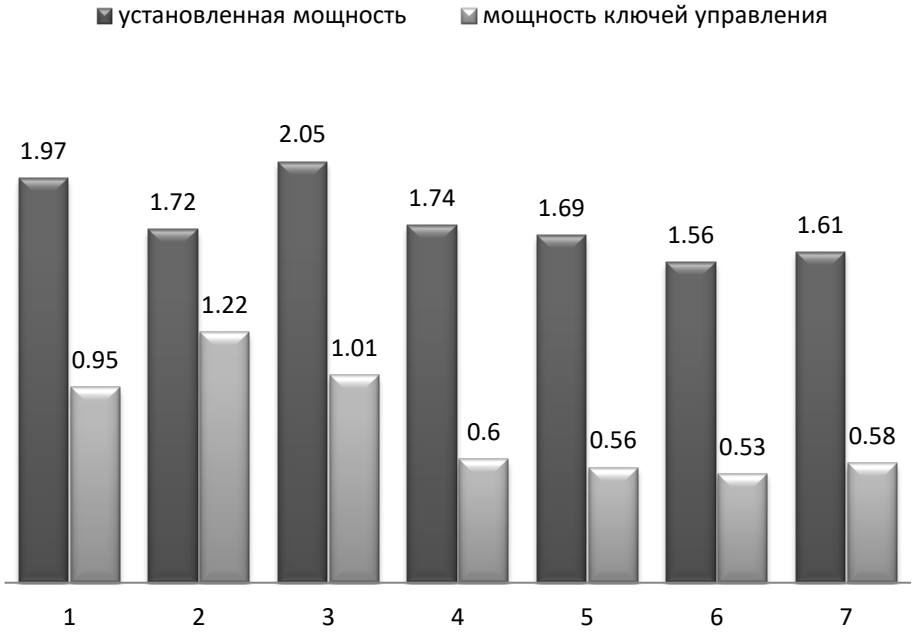


Рис.1.54. Сравнительная диаграмма установленной мощности различных схемных вариантов ФРТ

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

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

Преимущества применения конденсаторной батареи с ФРТ:

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

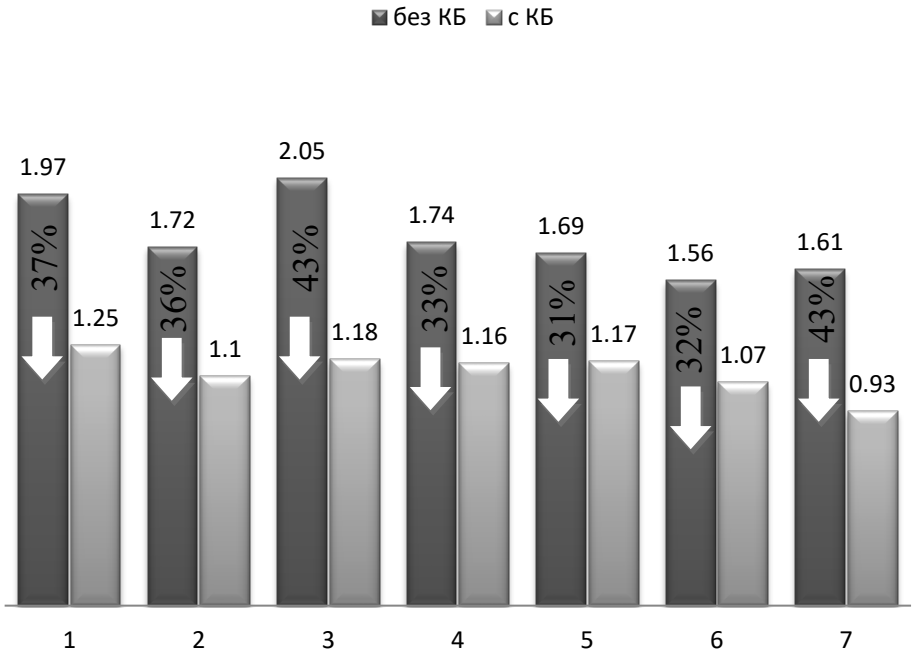


Рис.1.55. Сравнительная диаграмма установленной мощности различных схемных вариантов ФРТ с использованием конденсаторной батареи

На рис.1.55 представлена диаграмма типовой мощности различных схемных вариантов ФРТ с использованием конденсаторной батареи. Анализируя полученные результаты, можно сказать, что применение конденсаторной батареи позволяет существенно снизить установленную мощность ФРТ, в диапазоне 31÷43%.

2. ЧАСТОТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ФРТ С КРУГОВЫМ ВРАЩЕНИЕМ ФАЗЫ

2.1. Общие положения

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

1. Преобразование на постоянном токе (HVDC [20,81,21,75,119,124,43,69,5], «back-to-back» [76]). К основным достоинствам этой технологии можно отнести универсальность и быстродействие с точки зрения управления перетоками мощности, а также возможность передачи большей мощности по сравнению с передачей на переменном токе. Минусом преобразователя HVDC является необходимость двойного преобразования энергии (выпрямление и инвертирование) как на передающей, так и на приемной стороне. Это приводит к гармоническим искажениям синусоид рабочих токов и напряжений, что в свою очередь, требует применения сложных фильтро-компенсирующих устройств.

2. Преобразование на переменном токе (VFT-variable frequency transformer [84,89,65,101], ASEFC или АСЭМПЧ – асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты (asynchronized synchronous electromechanical frequency converter [28,98,66,31,105,91,2,122])). Основное достоинство поворотного трансформатора VFT состоит в том, что при любой кратности преобразования частоты рабочие напряжения и токи на его выходных клеммах всегда остаются строго синусоидальными. К недостаткам можно отнести:

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

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

–наличие механической инерционности ротора, сопровождающееся появлением электромеханических переходных процессов, что является дополнительным фактором негативного влияния на точность регулирования и стабилизации уровня передаваемой мощности;

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

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

В главе исследованы режимные параметры УМС, содержащей конверторы, реализующие технологию преобразования на основе статического трансформаторного устройства с круговым вращением фазы. Предлагаемые технические решения могут позволить избавиться от недостатков, отмеченных ранее, а также могут оказаться дешевле [139,141,71,112,18,72].

2.2 Математическое обоснование возможности реализации принципа кругового вращения фазы на основе трансформаторного устройства.

Обоснование возможности реализации принципа кругового преобразования фазы на статическом трансформаторном устройстве можно проиллюстрировать на примере схемы рис.2.1.

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

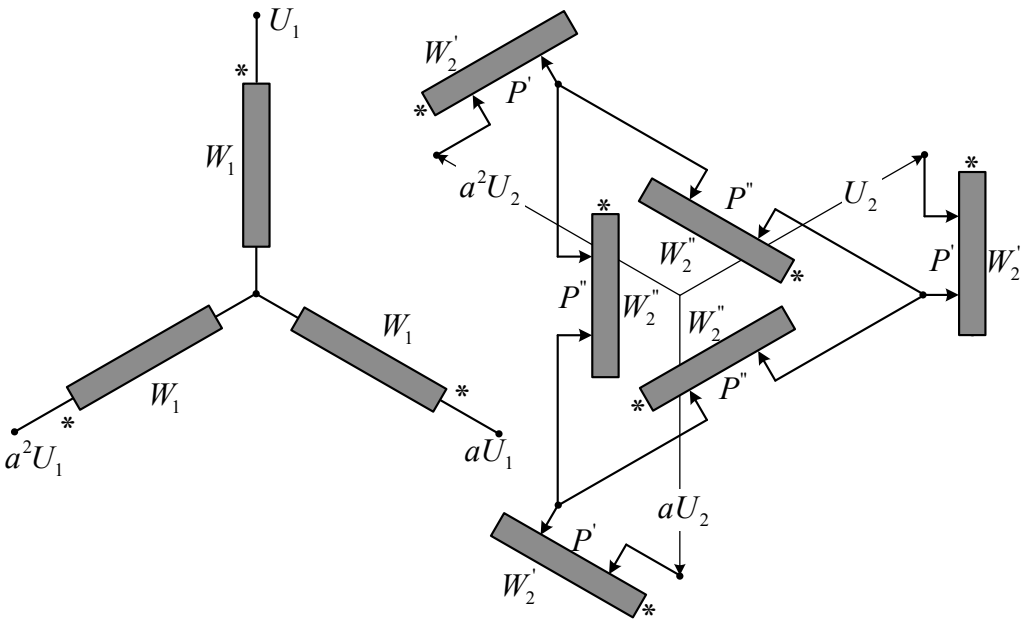


Рис.2.1. Схема рассматриваемого варианта устройства

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.2.1 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.2.2.

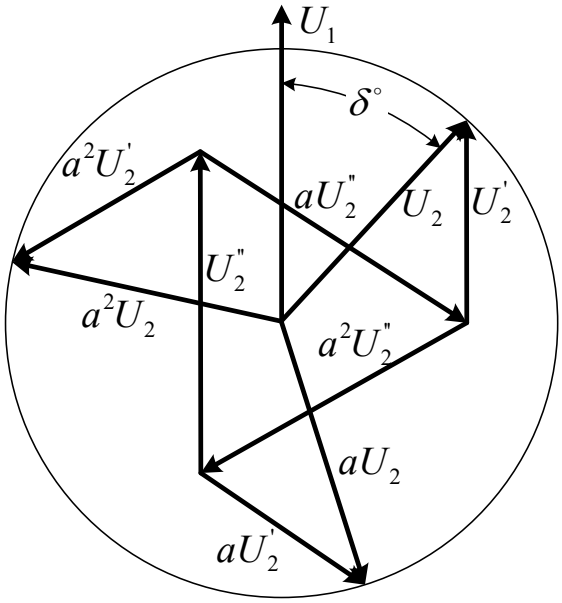


Рис.2.2. Векторная диаграмма напряжений устройства

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:

$$M_{12}' = k_1\sqrt{L_1L_2'}\ ;\ \ M_{12}'' = k_2\sqrt{L_1L_2''}\ ;\ \ M_{22}'' = k_3\sqrt{L_1'L_2''}\ ,$$

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.2.3.

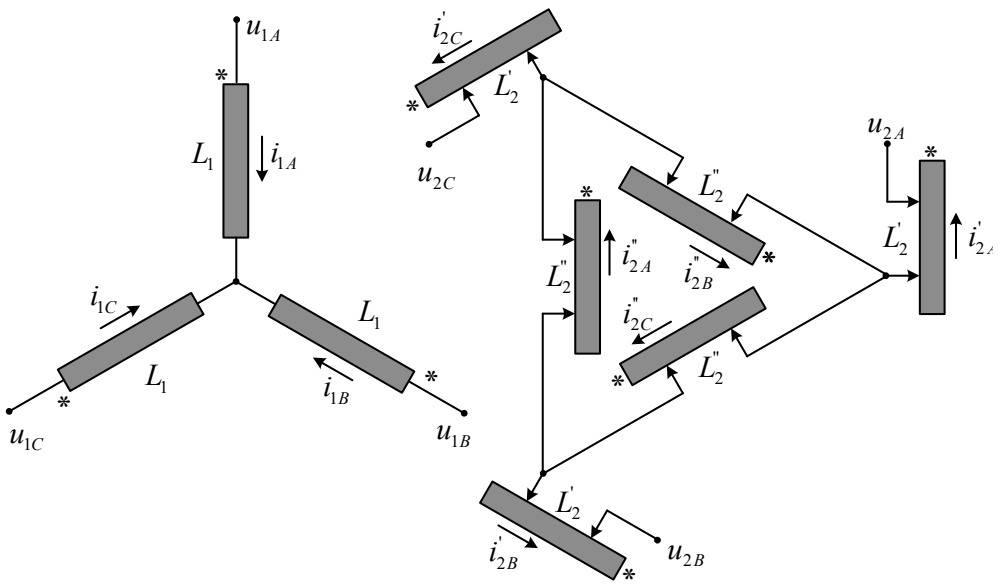


Рис.2.3. Схема, поясняющая условия анализа режима преобразования частоты

Уравнения равновесия ЭДС для первичных обмоток имеют вид:

$$\begin{aligned} &u_{1A} - r_1 i_{1A} - p\left(L_1 i_{1A} - M'_{12} i'_{2A} - M''_{12} i''_{2A}\right) = 0, \\ &u_{1B} - r_1 i_{1B} - p\left(L_1 i_{1B} - M'_{12} i'_{2B} - M''_{12} i''_{2B}\right) = 0, \\ &u_{1C} - r_1 i_{1C} - p\left(L_1 i_{1C} - M'_{12} i'_{2C} - M''_{12} i''_{2C}\right) = 0, \end{aligned} \tag{2.1}$$

где $p = \dfrac{d}{dt}$.

Вычитая из второго уравнения третье, получаем:

$$u_{1B} - u_{1C} - r_1\left(i_{1B} - i_{1C}\right) - p\left[L_1\left(i_{1B} - i_{1C}\right) - M'_{12}\left(i'_{2B} - i'_{2C}\right) - M''_{12}\left(i''_{2B} - i''_{2C}\right)\right] = 0. \tag{2.2}$$

Принимаем во внимание следующие условия:

$$\begin{aligned} &u_{1A} + u_{1B} + u_{1C} = 0, \;\; i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0, \\ &i''_{2A} - i''_{2B} = i'_{2C}, \;\; i''_{2C} - i''_{2A} = i'_{2B}. \end{aligned} \tag{2.3}$$

При этих условиях получаем:

$$\begin{aligned} &u_{1B} - u_{1C} - r_1\left(i_{1B} - i_{1C}\right) - p\left[L_1\left(i_{1B} - i_{1C}\right) - M'_{12}\left(i'_{2B} - i'_{2C}\right) - M''_{12} i'_{2A}\right] = 0, \\ &3u_{1A} - 3r_1 i_{1A} - 3p\left(L_1 i_{1A} - M'_{12} i'_{2A}\right) - pM''_{12}\left(i'_{2B} - i'_{2C}\right) = 0. \end{aligned} \tag{2.4}$$

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

$$\begin{aligned} &u_{2A} + r'_2 i'_{2A} + p\left(L'_2 i'_{2A} + M''_{22} i''_{2A} - M'_{12} i_{1A}\right) - r''_2 i''_{2C} - p\left(L''_2 i''_{2C} + M''_{22} i'_{2C} - M''_{12} i_{1C}\right) - r'_2 i'_{2B} - \\ &- p\left(L'_2 i'_{2B} + M''_{22} i''_{2B} - M'_{12} i_{1B}\right) - u_{2B} = 0, \\ &u_{2A} + r'_2 i'_{2A} + p\left(L'_2 i'_{2A} + M''_{22} i''_{2A} - M'_{12} i_{1A}\right) + r''_2 i''_{2B} + p\left(L''_2 i''_{2B} + M''_{22} i'_{2B} - M''_{12} i_{1B}\right) - r'_2 i'_{2C} - \\ &- p\left(L'_2 i'_{2C} + M''_{22} i''_{2C} - M'_{12} i_{1C}\right) - u_{2C} = 0. \end{aligned} \tag{2.5}$$

Полученные уравнения просуммируем с учетом условий 2.1. Приходим к следующему результату:

$$3u_{2A} + \left(3r_2^{'} + r_2^{''}\right)i_{2A}^{'} + \left(3L_2^{'} + L_2^{''}\right)pi_{2A}^{'} - 3M_{12}^{'}pi_{1A} - M_{12}^{''}p\left(i_{1B} - i_{1C}\right) = 0. \quad (2.6)$$

Сформируем новую систему уравнений, используя для этого выражения 2.4 и 2.6:

$$\begin{aligned}
&u_{1B} - u_{1C} - r_1\left(i_{1B} - i_{1C}\right) - p\left[L_1\left(i_{1B} - i_{1C}\right) - M_{12}^{'}\left(i_{2B}^{'} - i_{2C}^{'}\right) - M_{12}^{''}i_{2A}^{'}\right] = 0,\\
&3u_{1A} - 3r_1i_{1A} - 3p\left(L_1i_{1A} - M_{12}^{'}i_{2A}^{'}\right) - pM_{12}^{''}\left(i_{2B}^{'} - i_{2C}^{'}\right) = 0,\\
&3u_{2A} + \left(3r_2^{'} + r_2^{''}\right)i_{2A}^{'} + \left(3L_2^{'} + L_2^{''}\right)pi_{2A}^{'} - 3M_{12}^{'}pi_{1A} - M_{12}^{''}p\left(i_{1B} - i_{1C}\right) = 0.
\end{aligned} \quad (2.7)$$

Согласно первому уравнению системы 2.7 имеем:

$$p\left(i_{2B}^{'} - i_{2C}^{'}\right) = -\frac{1}{M_{12}^{'}}\left(u_{1B} - u_{1C}\right) + \frac{r_1}{M_{12}^{'}}\left(i_{1B} - i_{1C}\right) + \frac{L_1}{M_{12}^{'}}p\left(i_{1B} - i_{1C}\right) - \frac{M_{12}^{''}}{M_{12}^{'}}pi_{2A}^{'}.$$

Данное выражение подставим во второе уравнение системы 2.7:

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

Полученный результат представим в следующем виде:

$$\begin{aligned}
pi_{2A}^{'} = \frac{1}{3M_{12}^{'2} + M_{12}^{''2}}&\left[-3M_{12}^{'}u_{1A} - M_{12}^{''}\cdot\left(u_{1B} - u_{1C}\right) + +3r_1M_{12}^{'}i_{1A} + r_1M_{12}^{''}\left(i_{1B} - i_{1C}\right) + \right.\\
&\left.+3L_1M_{12}^{'}pi_{1A} + L_1M_{12}^{''}p\left(i_{1B} - i_{1C}\right)\right] = 0.
\end{aligned} \quad (2.8)$$

Интегрируя обе части этого уравнения, определим выражение для тока $i_{2A}^{'}$:

$$\begin{aligned}
i_{2A}^{'} = \frac{1}{3M_{12}^{'2} + M_{12}^{''2}}&\left[-3M_{12}^{'}\frac{1}{p}u_{1A} - M_{12}^{''}\cdot\frac{1}{p}\left(u_{1B} - u_{1C}\right) + 3r_1M_{12}^{'}\frac{1}{p}i_{1A} + r_1M_{12}^{''}\cdot\right.\\
&\left.\cdot\frac{1}{p}\left(i_{1B} - i_{1C}\right) + 3L_1M_{12}^{'}i_{1A} + L_1M_{12}^{''}\cdot\left(i_{1B} - i_{1C}\right)\right] = 0.
\end{aligned} \quad (2.9)$$

Выражения для $i_{2A}^{'}$ и $pi_{2A}^{'}$ подставим в третье уравнение системы 2.7. После алгебраических преобразований получим:

$$
\begin{aligned}
&3u_{2A}-\frac{3M'_{12}}{3M'^{2}_{12}+M''^{2}_{12}}\left[\left(3r'_2+r''_2\right)\frac{1}{p}u_{1A}+\left(3L'_2+L''_2\right)u_{1A}\right]-\frac{M''_{12}}{3M'^{2}_{12}+M''^{2}_{12}}\left[\left(3r'_2+r''_2\right)\frac{1}{p}\cdot\right.\\
&\left.\cdot\left(u_{1B}-u_{1C}\right)+\left(3L'_2+L''_2\right)\left(u_{1B}-u_{1C}\right)\right]+\frac{3M'_{12}}{3M'^{2}_{12}+M''^{2}_{12}}\left\{L_1\left(3L+L''_2\right)pi_{1A}+\left[L_1\cdot\right.\right.\\
&\left.\left.\cdot\left(3r'_2+r''_2\right)+r_1\left(3L'_2+L''_2\right)\right]i_{1A}+r_1\left(3r'_2+r''_2\right)\cdot\frac{1}{p}i_{1A}\right\}+\frac{M''_{12}}{3M'^{2}_{12}+M''^{2}_{12}}\left\{L_1\left(3L'_2+L''_2\right)p\cdot\right.\\
&\left.\left(i_{1B}-i_{1C}\right)+\left[r_1\left(3L'_2+L''_2\right)+L_1\left(3r'_2+r''_2\right)\right]\left(i_{1B}-i_{1C}\right)+r_1\left(3r'_2+r''_2\right)\frac{1}{p}\left(i_{1B}-i_{1C}\right)\right\}-\\
&3pM'_{12}i_{1A}-pM''_{12}\left(i_{1B}-i_{1C}\right)=0.
\end{aligned}
\tag{2.10}
$$

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

$\omega_c=\omega_2-\omega_1=\dfrac{d\delta}{dt}$,

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:

$$
\begin{gathered}
L'_2=L_2\cos^2\omega_C t\,,\quad L''_2=3L_2\sin^2\omega_C t\,,\\
M'_{12}=k_1\sqrt{L_1L_2}\cos\omega_C t\,,\ M''_{12}=\sqrt{3}k_2\sqrt{L_1L_2}\sin\omega_C t\,.
\end{gathered}
$$

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:

$$
\begin{aligned}
&u_{1A}=U_1\sin\omega_1 t,\\
&u_{1B}-u_{1C}=\sqrt{3}U_1\cos\omega_1 t,\\
&i_{1A}=I_1\sin\left(\omega_1 t-\varphi\right),\\
&i_{1B}-i_{1C}=\sqrt{3}I_1\cos\left(\omega_1 t-\varphi\right).
\end{aligned}
\tag{2.11}
$$

Выражения для собственных и взаимных индуктивностей, активных сопротивлений обмоток, а также соотношения 2.11 подставим в уравнение 2.10. Приходим к результату:

$$u_{2A}=\frac{1}{\sqrt{L_1L_2}\left(k_1^2\cos^2\omega_C t+k_2^2\sin^2\omega_C t\right)}\cdot\left\{\frac{L_2}{2}\left[\left(k_1+k_2\right)\sin\left(\omega_1+\omega_C\right)t+\left(k_1-k_2\right)\cdot\right.\right.$$
$$\cdot\sin\left(\omega_1-\omega_C\right)t\Big]-\frac{r_2}{\sqrt{3}w_1}\cos\left(\omega_C t-\frac{\pi}{6}\right)\cdot\left[\left(k_1+k_2\right)\cos\left(\omega_1+\omega_C\right)t+\left(k_1-k_2\right)\cdot\right.$$
$$\left.\cdot\cos\left(\omega_1-\omega_C\right)t\right]\Big\}\cdot U_1+\frac{1}{\sqrt{L_1L_2}\left(k_1^2\cos^2\omega_C t+k_2^2\sin^2\omega_C t\right)}\cdot\left\{A\left[\left(k_1+k_2\right)\cos\left[\left(\omega_1+\omega_C\right)\cdot\right.\right.\right. \quad (2.12)$$
$$\cdot t-\varphi\Big]+\left(k_1-k_2\right)\cdot\cos\left[\left(\omega_1-\omega_C\right)t-\varphi\right]\Big]-B\left[\left(k_1+k_2\right)\sin\left[\left(\omega_1+\omega_C\right)t-\varphi\right]+\left(k_1-k_2\right)\cdot$$
$$\left.\left.\cdot\sin\left[\left(\omega_1+\omega_C\right)t-\varphi\right]\right]\right\}\cdot I_1++\frac{1}{2}\omega_1\sqrt{L_1L_2}\left[\left(k_1+k_2\right)\cos\left[\left(\omega_1-\omega_C\right)t-\varphi\right]+\left(k_1-k_2\right)\cdot\right.$$
$$\left.\cdot\cos\left[\left(\omega_1-\omega_C\right)t-\varphi\right]\right]I_1.$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$A=\frac{r_1r_2\cos\left(\omega_C t-\frac{\pi}{6}\right)}{\sqrt{3}\omega_1}-\frac{1}{2}L_1L_2\omega_1,\quad B=\frac{L_1r_2\cos\left(\omega_C t-\frac{\pi}{6}\right)}{\sqrt{3}}-\frac{1}{2}r_1L_2.$$

Равенство 2.12 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 2.12 принимает вид:

$$u_{2A}=\frac{1}{k\sqrt{L_1L_2}}\left\{\left[L_2\sin\left(\omega_1+\omega_C\right)t-\frac{2r_2}{\sqrt{3}\omega_1}\cdot\cos\left(\omega_C t-\frac{\pi}{6}\right)\cos\left(\omega_1+\omega_C\right)t\right]U_1+\left[2A\cdot\right.\right.$$
$$\left.\left.\cdot\cos\left[\left(\omega_1-\omega_C\right)t-\varphi\right]-2B\sin\left[\left(\omega_1+\omega_C\right)t-\varphi\right]\right]I_1\right\}+k\omega_1\sqrt{L_1L_2}\cos\left[\left(\omega_1+\omega_C\right)t-\varphi\right]I_1. \quad (2.13)$$

Полагаем далее, что $r_1=\omega_1L_1$ и $r_2=\omega_1L_2$ - допущение, справедливое для рассматриваемого класса устройств. Тогда можно считать, что $A=-\frac{1}{2}L_1L_2\omega_1$, $B=0$, а равенство 2.13 преобразуется к виду:

$$u_{2A}=\frac{1}{k}\sqrt{\frac{L_2}{L_1}}U_1\sin\left(\omega_1+\omega_C\right)t-\frac{1-k^2}{k}\omega_1\cdot\sqrt{L_1L_2}I_1\cos\left[\left(\omega_1+\omega_C\right)t-\varphi\right].$$

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

$$u_{2A}=\frac{1}{k}\sqrt{\frac{L_2}{L_1}}U_1\sin\omega_2t-\frac{1-k^2}{k}\omega_1\sqrt{L_1L_2}\cdot I_1\cos\left(\omega_2t-\varphi\right).$$

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.

2.3 УМС на базе фазорегулирующего устройства по схеме «треугольник».

Условия проведения экспериментов

Расчетные эксперименты проводились исходя из следующих условий:

- напряжение передающей системы $U_s = 230В$, частота $f_s = 60Гц$;
- напряжение приемной системы $U_r = 230В$, частота $f_r = 50Гц$;
- активная мощность передается в направлении от энергосистемы S к энергосистеме R;
- передающая S и приемная R энергосистемы представлены в моделях как шины бесконечной мощности, т.е. $U_s = U_r = const$;
- уровень передаваемой активной мощности поддерживается на постоянном уровне 4500Вт ±10% за счет корректировки угла между передающей и приемной системой;
- параметры имитационных моделей приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя;
- расчетное время моделирование $t = 2$ секунды;
- для каждого предложенного варианта устройства эксперименты выполнены по схеме, обеспечивающей работу преобразователя через межсистемную связь, имеющую волновую длину 15° и представленной на рис.2.4.

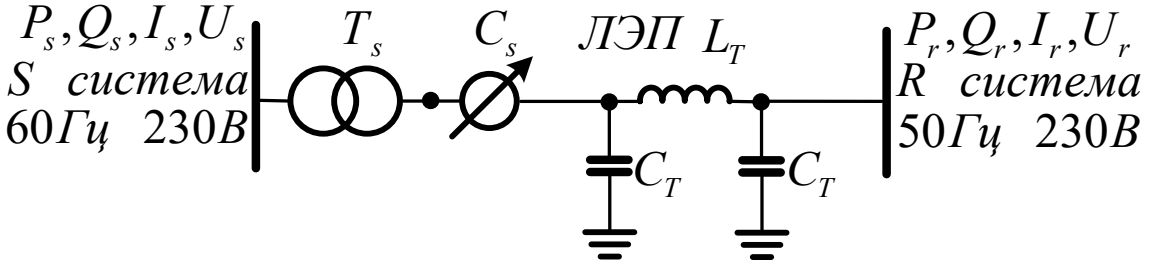


Рис.2.4.Схема проведения эксперимента при параллельной работе двух энергосистем через частотный преобразователь и ЛЭП 15°

Для сравнения схемных вариантов с точки зрения качества преобразования частоты и передачи мощности были использованы следующие режимные параметры:

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

Одноканальный преобразователь частоты

Схема одноканального преобразователя приведена на рис.2.5. Основным элементом преобразователя, определяющим его отличие от других технических решений, является фазорегулирующий трансформатор (C_s), образованный соединенными в треугольник нерегулируемыми обмотками (W_p) и примыкающими к вершинам этого треугольника регулируемыми обмотками (W_q).

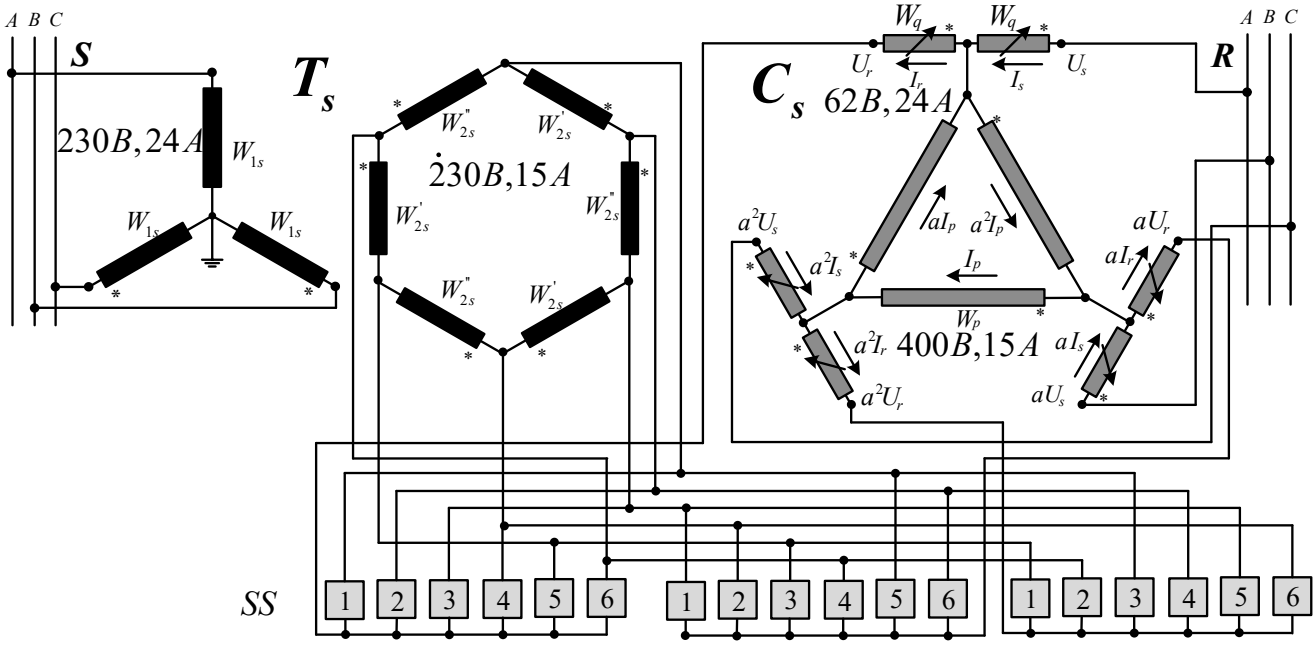


Рис.2.5. Схема одноканального преобразователя частоты

При этом каждая присоединенная к конкретной вершине треугольника регулируемая обмотка принадлежит фазе соответствующей нерегулируемой обмотки, которая противолежит данной вершине. Все регулируемые обмотки были выполнены по схеме, представленной на рис.1.7.

Каждая регулируемая обмотка разделена на две секции, имеющие промежуточные ответвления которые, также как и концевые выводы секций этих обмоток, присоединены к силовым электронным коммутаторам.

Собственно коммутаторы условно изображены в виде квадратов, пронумерованных цифрами от 1 до 10. Дробные арифметические соотношения характеризуют принцип секционирования регулируемых обмоток, обеспечивающий при данных условиях 12 дискретных значений снимаемого с них напряжения (как условно положительного, так и противоположного ему знака при реверсировании).

Совокупность, представляемая фазорегулирующим трансформатором и силовыми электронными коммутаторами регулируемых обмоток, образует блок тонкого регулирования преобразовательного устройства и предусматривает возможность регулирования фазового сдвига выходного напряжения относительно приложенного в диапазоне ±30°.

Полная окружность регулирования, как показано на рис.2.6, разделена на 6 отдельных секторов, по 60° каждый, в рамках которых осуществляется процедура «тонкого» регулирования, обеспечиваемая секционированными обмотками управления рис.1.7.

Переключение секторов обеспечивается с помощью силовых полупроводниковых коммутаторов SS, которые, совместно с силовым трансформатором T_s, образуют блок «грубого» регулирования. Вторичная обмотка трансформатора T_s выполнена по схеме правильного шестиугольника, вершины которого являются опорными точками соответствующих секторов. Первичная обмотка силового трансформатора T_s подключена к питающей сети. К выходным клеммам фазорегулирующего трансформатора C_s подключена нагрузка.

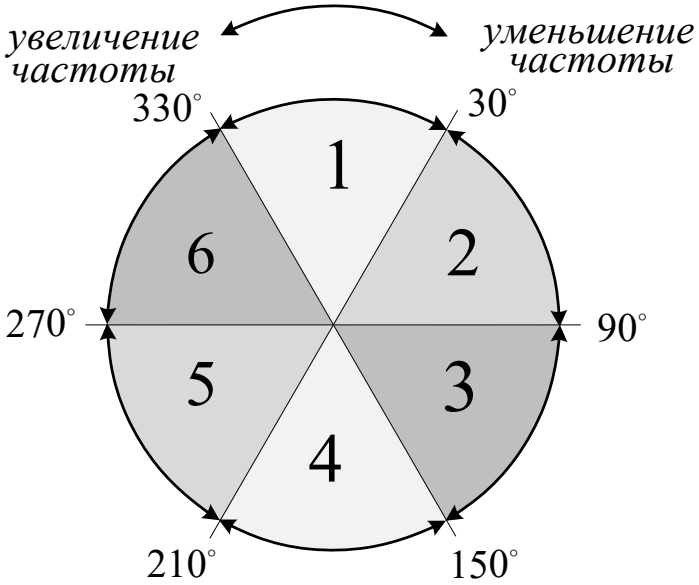


Рис.2.6. Сектора «грубого» регулирования устройства

При симметричном (одновременном) переключении обмоток управления степень дискретности одной ступени составляет 2,5°. Таким образом, каждый сектор «грубого» регулирования содержит 24, а вся окружность содержит 150 фиксированных позиций значений угла фазового сдвига.

Стратегию управления для данных условий отражает диаграмма переключения, представленная на рис.1.8.

На основе структурно–имитационной модели были проведены расчетные эксперименты по схеме рис.2.4. Осциллограммы и характеристики, иллюстрирующие поведение контролируемых режимных параметров, приведены на рис.2.7a,c для передающей и рис.2.7b,d для принимающей систем соответственно.

Анализ, представленных на рис.2.7 характеристик, позволяет сделать вывод о том, что учет емкостной проводимости ЛЭП приводит к превышению уровня искажений кривых тока, регламентируемых стандартом IEEE-519-2014 [60].

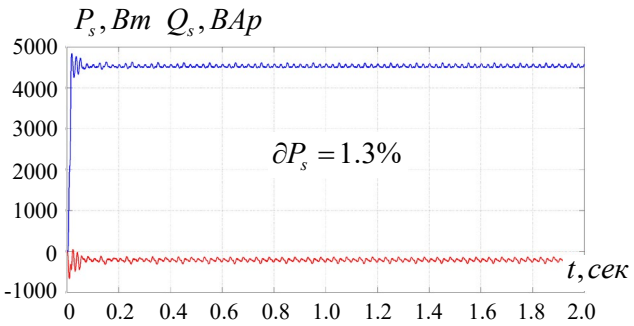


Рис.2.7a. Активная и реактивная мощность на передающей P_s системе

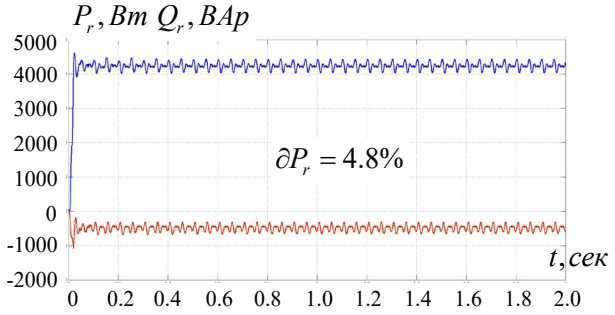


Рис. 2.7b. Активная и реактивная мощность на приемной P_r системе

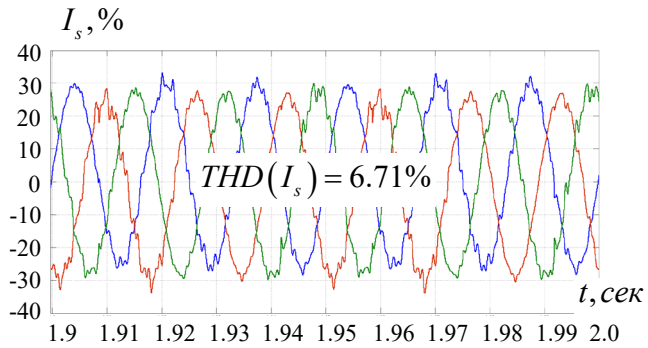


Рис. 2.7c. Осциллограмма токов на передающей I_s системе

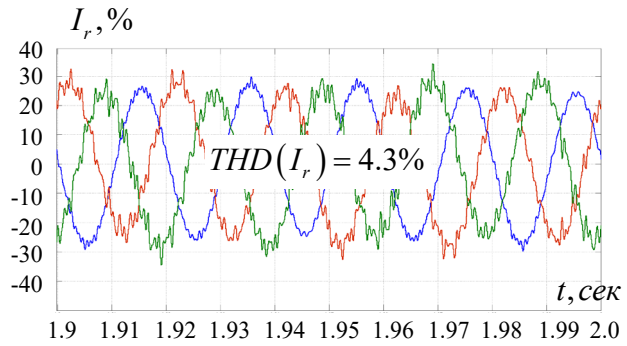


Рис. 2.7d. Осциллограмма токов на и приемной I_r системе

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

Двухканальный преобразователь частоты

Схема двухканального преобразователя на базе 6-и фазного согласующего трансформатораи стратегией управления, описанной выше, представлена на рис.2.8.

В качестве мероприятия по улучшению процесса преобразования, было предложено разделение потока передаваемой мощности на два параллельных канала с разнесением моментов коммутации блоков «грубого» регулирования по времени за счет фиксированного 30-и градусного фазового сдвига между напряжениями питающей системы. Осциллограммы и характеристики, полученные в ходе расчетных экспериментов и, иллюстрирующие эффективность двухканальной схемы с точки зрения улучшения параметров качества преобразования, приведены на рис.2.9a,c для передающей и рис.2.9b,d для принимающей систем соответственно.

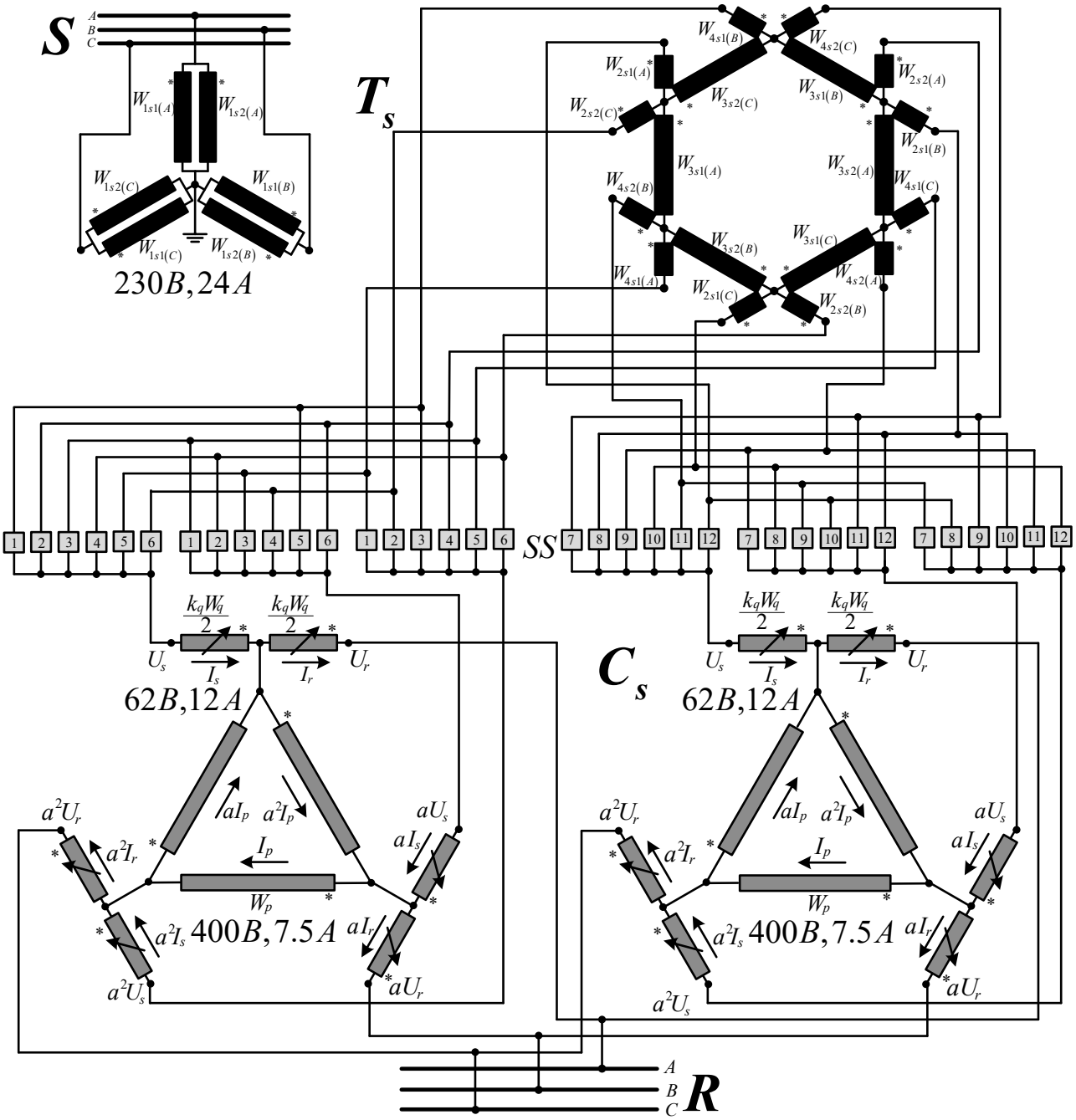


Рис.2.8. Электрическая схема двухканального преобразователя

Выполнено сравнение результатов, приведенных на рис.2.7 и рис.2.9, из которого следует, что применение двухканальной схемы позволяет существенно улучшить качество преобразования по частоте и отклонению передаваемой мощности.

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

Схема обмотки управления и закон управления силовыми ключами представлены на рис.2.10 и рис.2.11 соответственно.

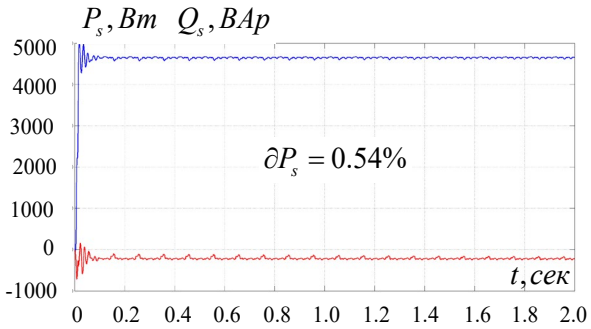


Рис.2.9a. Активная и реактивная мощность на передающей P_s системе

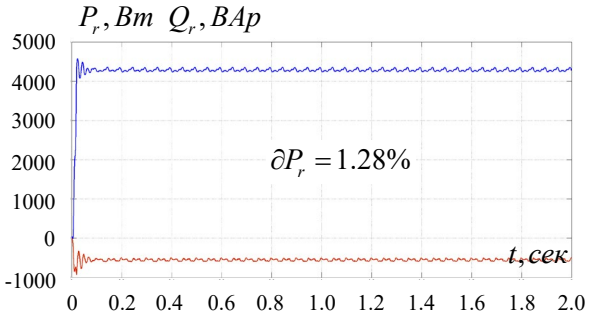


Рис. 2.9b. Активная и реактивная мощность на приемной P_r системе

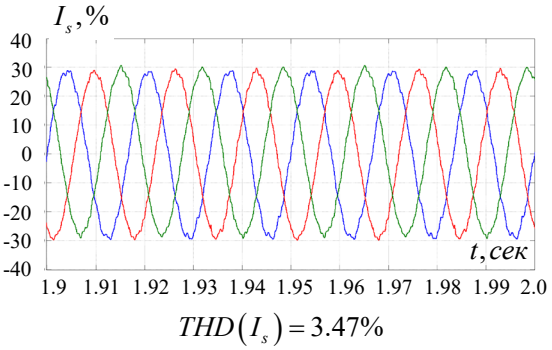


Рис.2.9c. Осциллограмма токов на передающей I_s системе

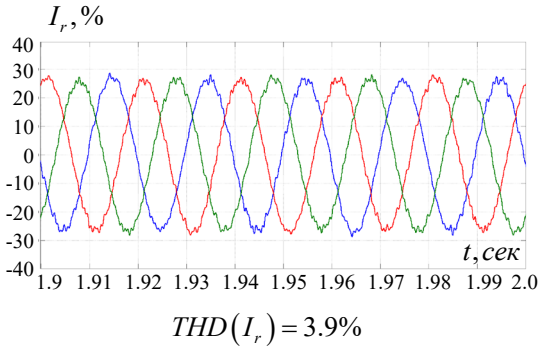


Рис. 2.9d. Осциллограмма токов на приемной I_r системе

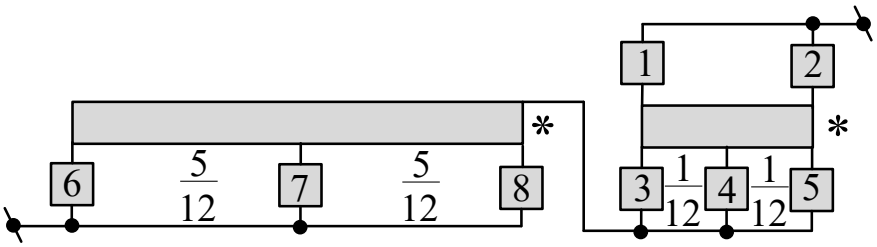


Рис. 2.10. Обмотка управления фазовращающего трансформатора, обеспечивающая «безреверсную» стратегию управления

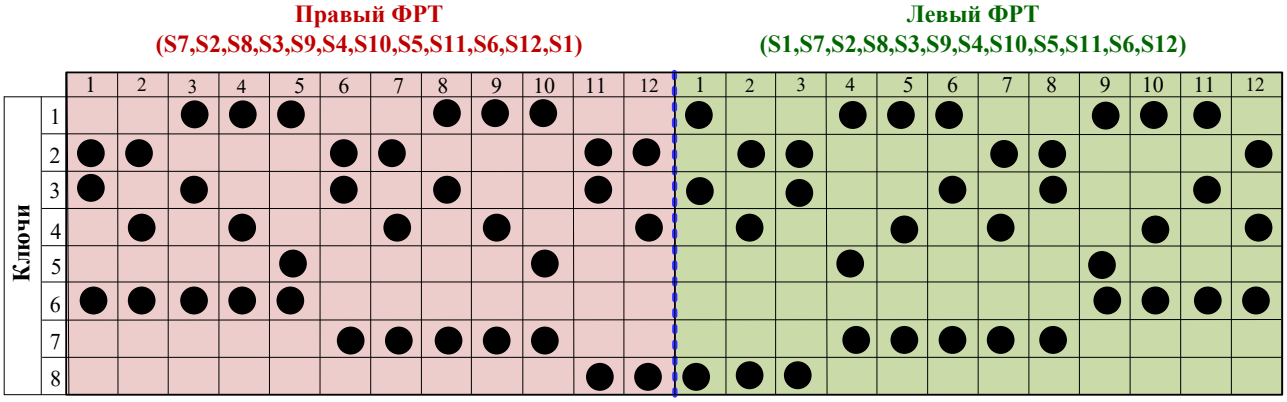


Рис. 2.11. Закон управления силовыми ключами двухканального преобразователя

Схема двухканального 24-позиционного преобразователя на базе «безреверсной» стратегии управления представлена на рис.2.12.

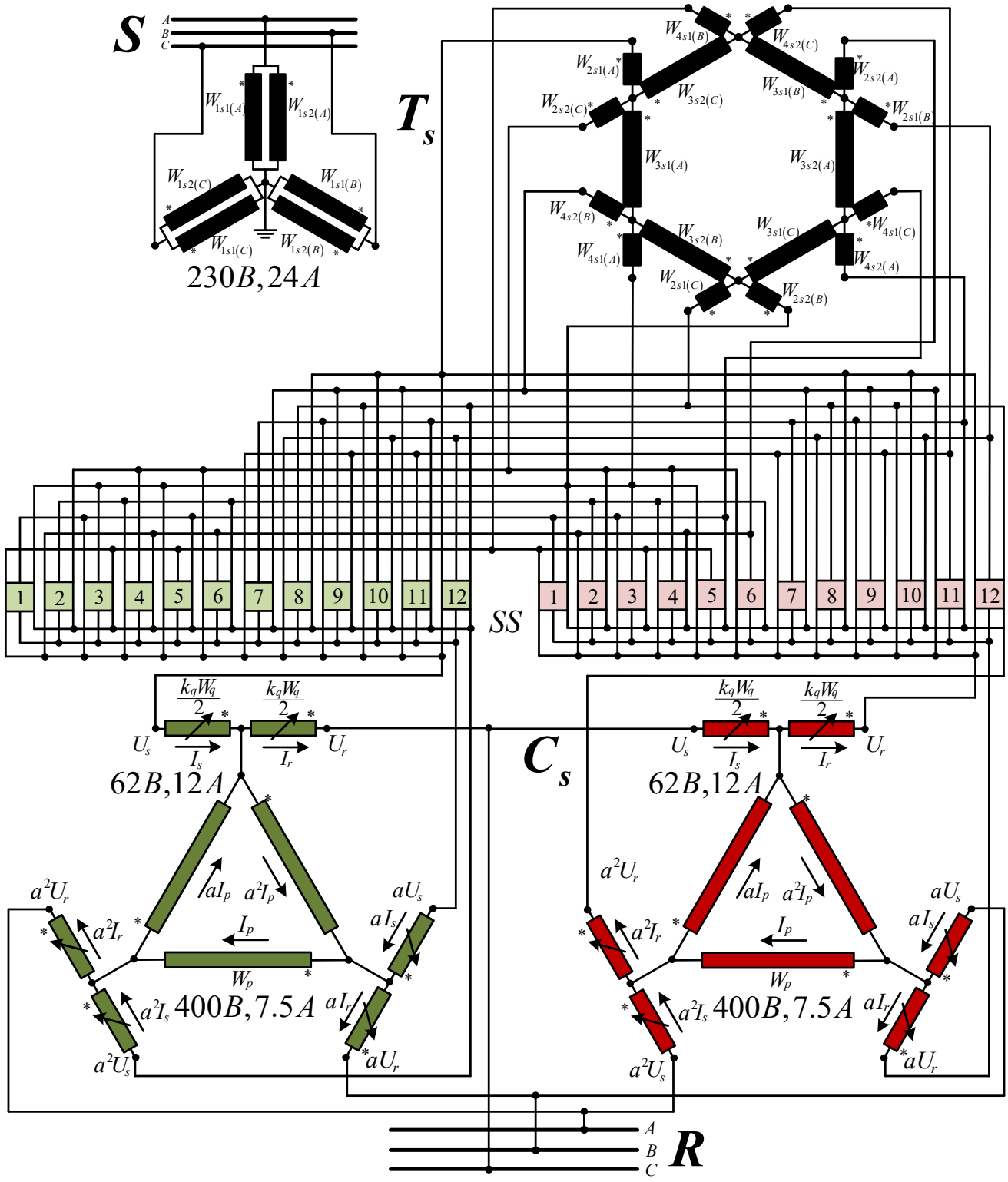


Рис. 2.12. Электрическая схема двухканального преобразователя на базе «безреверсной» стратегии управления

Преобразователь рис.2.12 имеет на 12 силовых ключей «грубого» регулирования больше и на 24 силовых ключа «тонкого» регулирования меньше по сравнению со схемным вариантом, рис.1.8. Следует отметить, что и в первом и во втором случае, суммарная мощность ключей «грубого» регулирования остается неизменной.

Результаты экспериментов, полученных при моделировании двухканального преобразователя с «безреверсной» стратегией управления представлены на рис.2.13a,c для передающей и рис. 2.13b,d для принимающей систем соответственно.

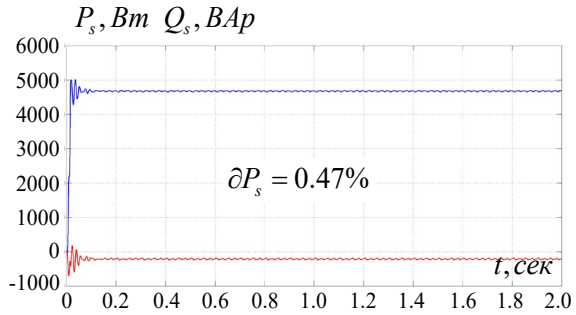


Рис. 2.13a. Активная и реактивная мощность на передающей P_s системе

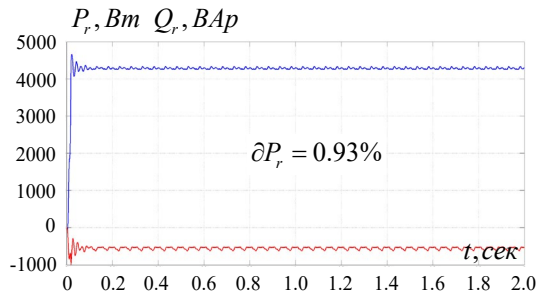
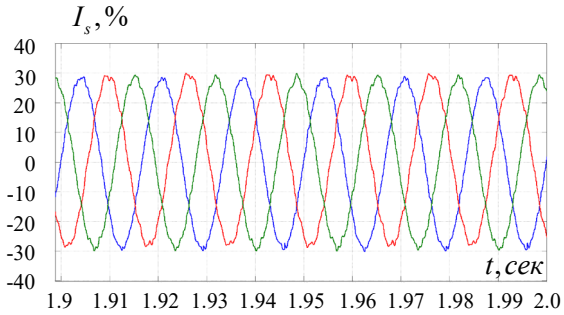
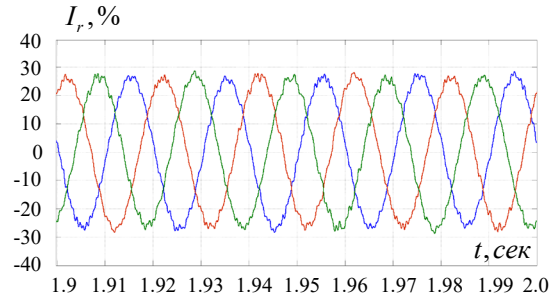


Рис. 2.13b. Активная и реактивная мощность на приемной P_r системе



$THD(I_s) = 2.33\%$

Рис. 2.13c. Осциллограмма токов на передающей I_s системе



$THD(I_r) = 3.85\%$

Рис. 2.13d. Осциллограмма токов на и приемной I_r системе

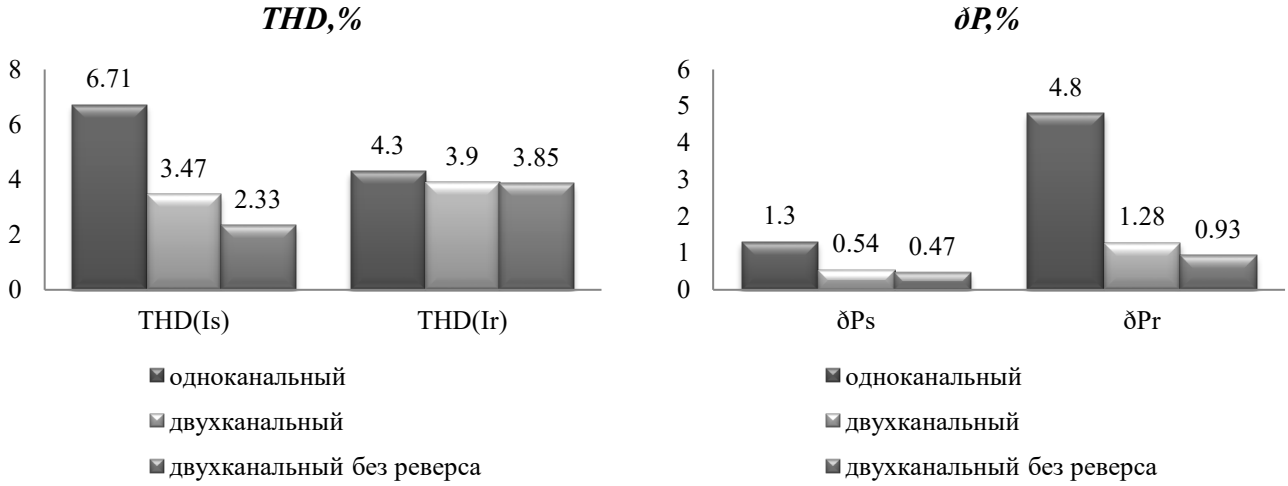


Рис.2.14. Режимные параметры передачи при различных способах улучшения качества преобразования

Сравнение информации, представленной на рис. 2.13 и рис.2.9 и приводит к заключению о технической эффективности «безреверсной» стратегии управления, при использовании которой улучшаются характеристики преобразования. Это обусловлено более «мягким» режимом переключения за счет меньшего суммарного количества силовых ключей в схеме, создающих при коммутациях всплески (стробы) тока и напряжения.

Результаты сравнительного анализа различных технических мероприятий по повышению эффективности работы частотного преобразователя на основе ФРТ приведены на рис.2.14 в виде гистограмм, которые доказывают эффективность предлагаемых решений.

Индуктивные элементы (дроссели) как средство повышения качества преобразования.

В связи с необходимостью улучшения качества преобразования актуальной является задача поиска технических решений, позволяющих усовершенствовать процесс преобразования в электрической связи, объединяющей две энергосистемы с частотой 60 и 50 Гц.

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

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

Результаты моделирования

Схема проведения эксперимента для исследуемых схемных вариантов преобразователей представлена на рис.2.15.

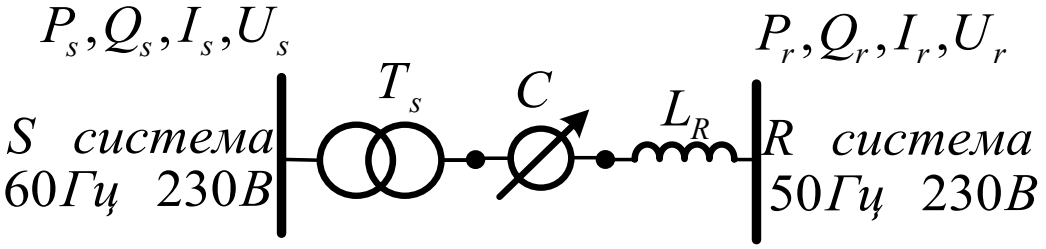


Рис.2.15. Схема проведения эксперимента

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

Зависимости контролируемых режимных параметров от величины индуктивности подключаемого дросселя (L_R) приведены на рис.2.16÷2.19 для рассмотренных схемных вариантов преобразователей:

- одноканального (рис.2.5);
- двухканального с реверсированием обмотки управления (рис.2.8);
- двухканального без реверсирования обмотки управления (рис.2.12).

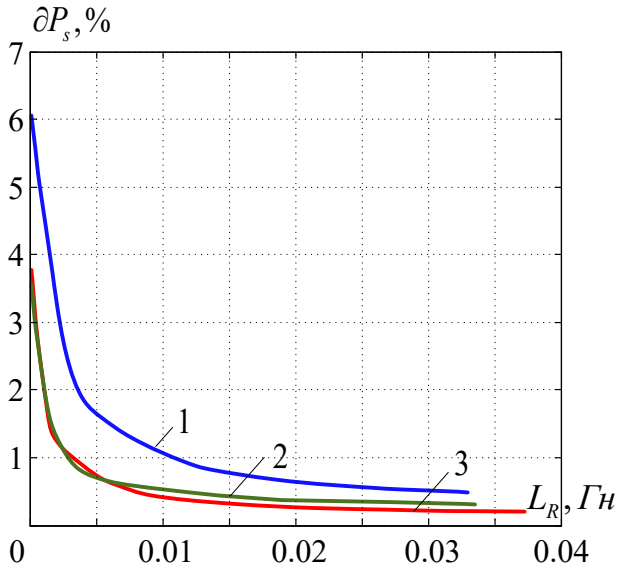


Рис.2.16. Степень колебательности активной мощности на шинах передающей системы

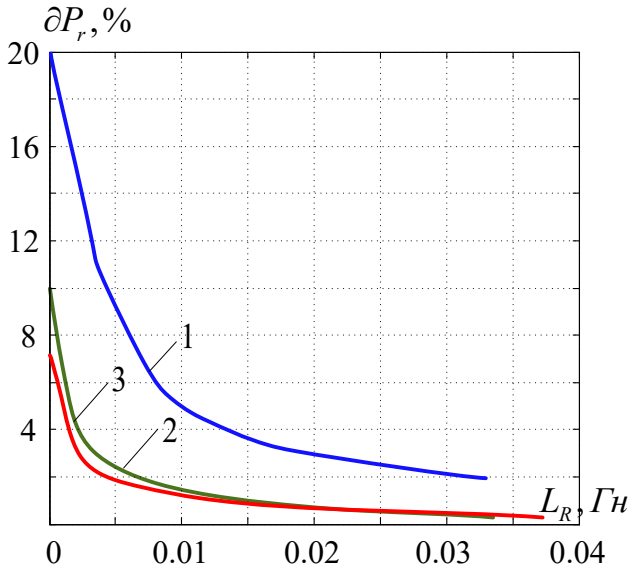


Рис.2.17. Степень колебательности активной мощности на шинах приемной системы

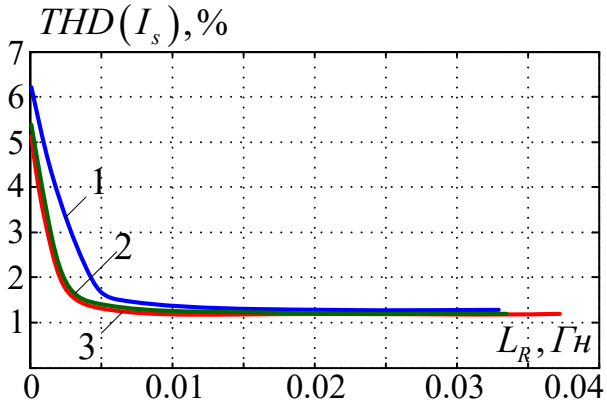


Рис.2.18. Коэффициент гармонических искажений тока на шинах передающей системы

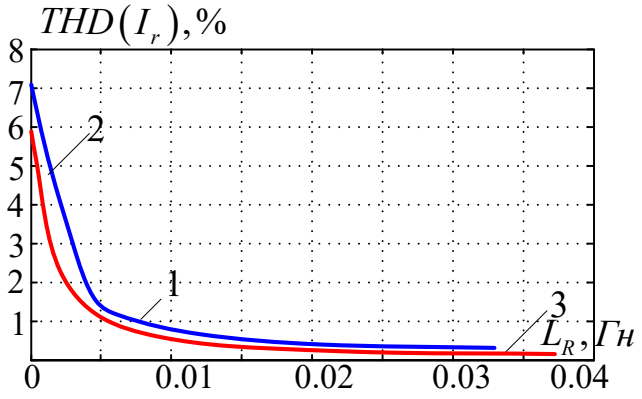


Рис.2.19. Коэффициент гармонических искажений тока на шинах приемной системы

Представленные зависимости демонстрируют преимущество двухканальной «безреверсной» схемы с точки зрения улучшения качества режимных параметров.

Изменение величины индуктивности дросселя от 0 до 0,35 приводит к улучшению контролируемых величин:

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

Представленные зависимости (рис.2.16÷2.19) позволяют определить значения индуктивностей дросселей, обеспечивающие наилучшие характеристики передачи:

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

Гистограммы, иллюстрирующие соотношение контролируемых параметров режима преобразования для выбранных дросселей, приведены на рис. 2.20, 2.21.

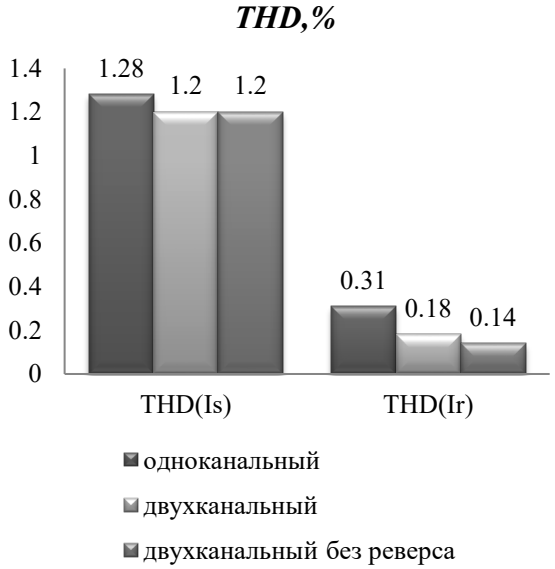


Рис.2.20. Коэффициенты гармонических искажений токов на передающей и принимающей системах

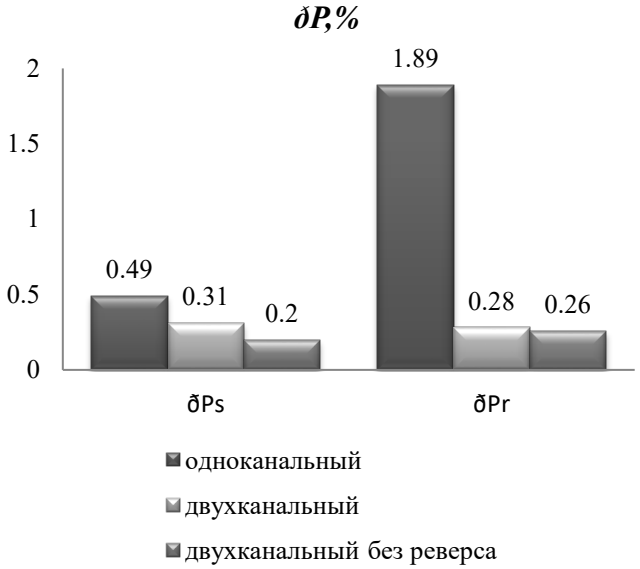


Рис. 2.21. Девиация активной мощности на передающей и принимающей системах

Приведенные на рис.2.20, 2.21 данные позволяют сделать вывод о соответствии контролируемых характеристик режима стандарту IEEE-519-2014.[60]

2.4 УМС на базе преобразователя выполненного по схеме «зигзаг»

Принципиальная схема и принцип работы устройства

Схема двухканального статического преобразователя частоты выполненного по схеме «зигзаг» представлена на рис.2.22.

Каждый канал устройства 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 гармоники 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 2.1 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:

$$\pm\psi = arctg\left(\frac{U_л}{3\cdot U_ф}\right) = \pm 30^{\circ}, \qquad (2.14)$$

где

$U_л$ - линейное напряжение;

$U_ф$ - фазное напряжение.

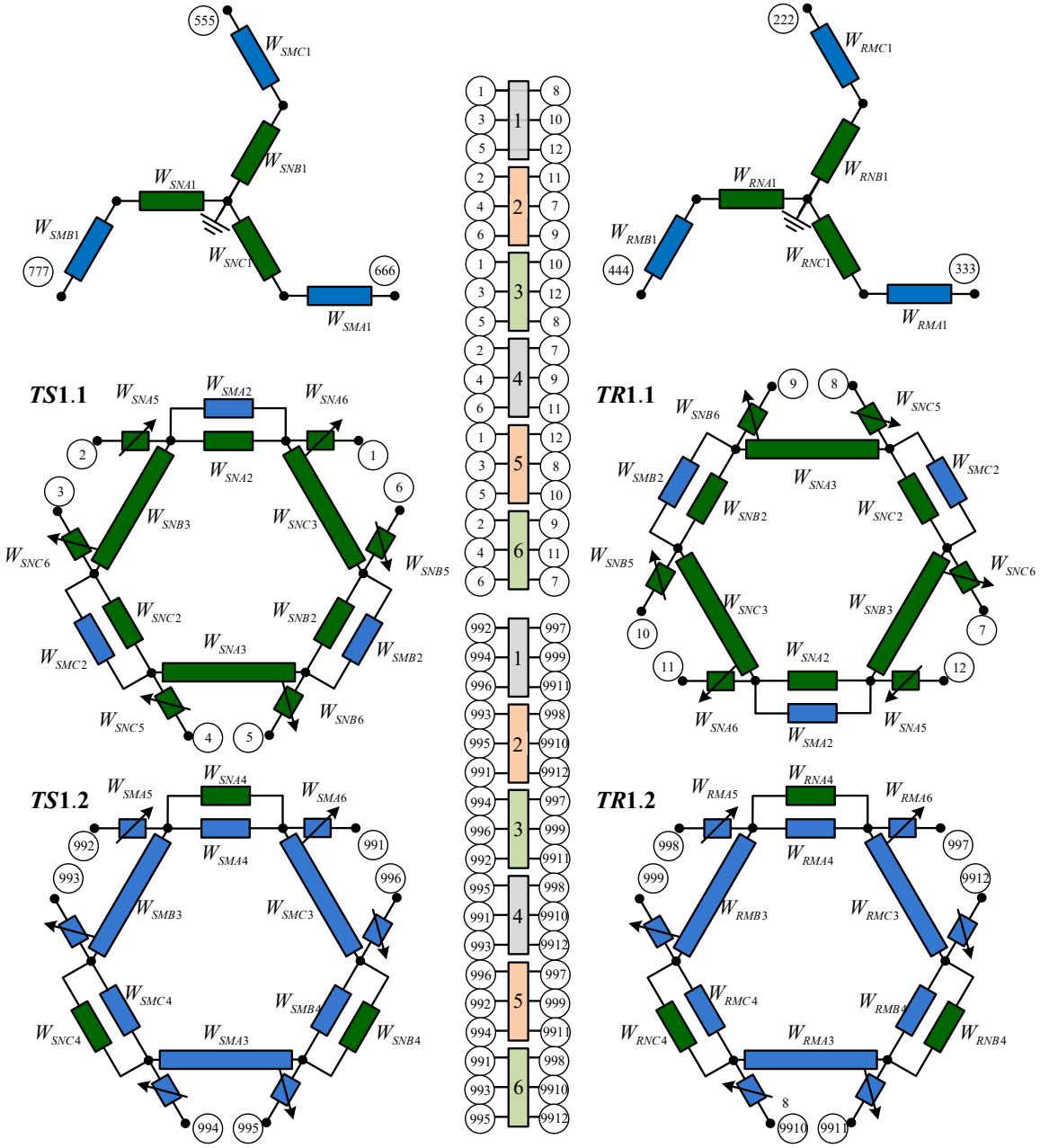


Рис.2.22. Схема двухканального статического преобразователя частоты по схеме «зигзаг».

Из выражения 2.14 следует, что фазовый сдвиг напряжения 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.2.22, 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 римскими 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. 2.23.

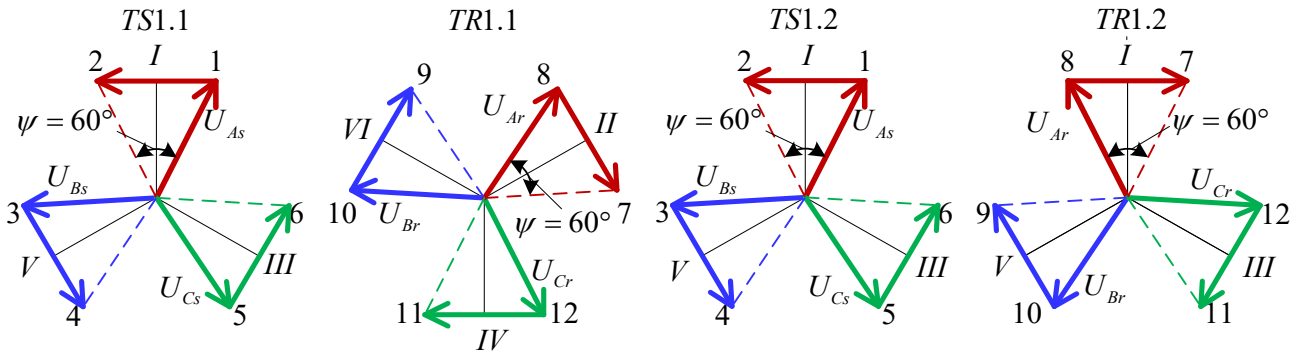


Рис.2.23. Векторная диаграмма напряжений в исходном состоянии

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. Такое исходное состояние задает направление передаваемой мощности.

Процесс кругового вращения фазы выходного напряжения относительно входного можно проиллюстрировать 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.2.24.

Из анализа векторной диаграммы представленной на рис.2.24 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* разворачивается 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, цикл 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 «грубого» управлением через 120° приведена на рис.2.25.

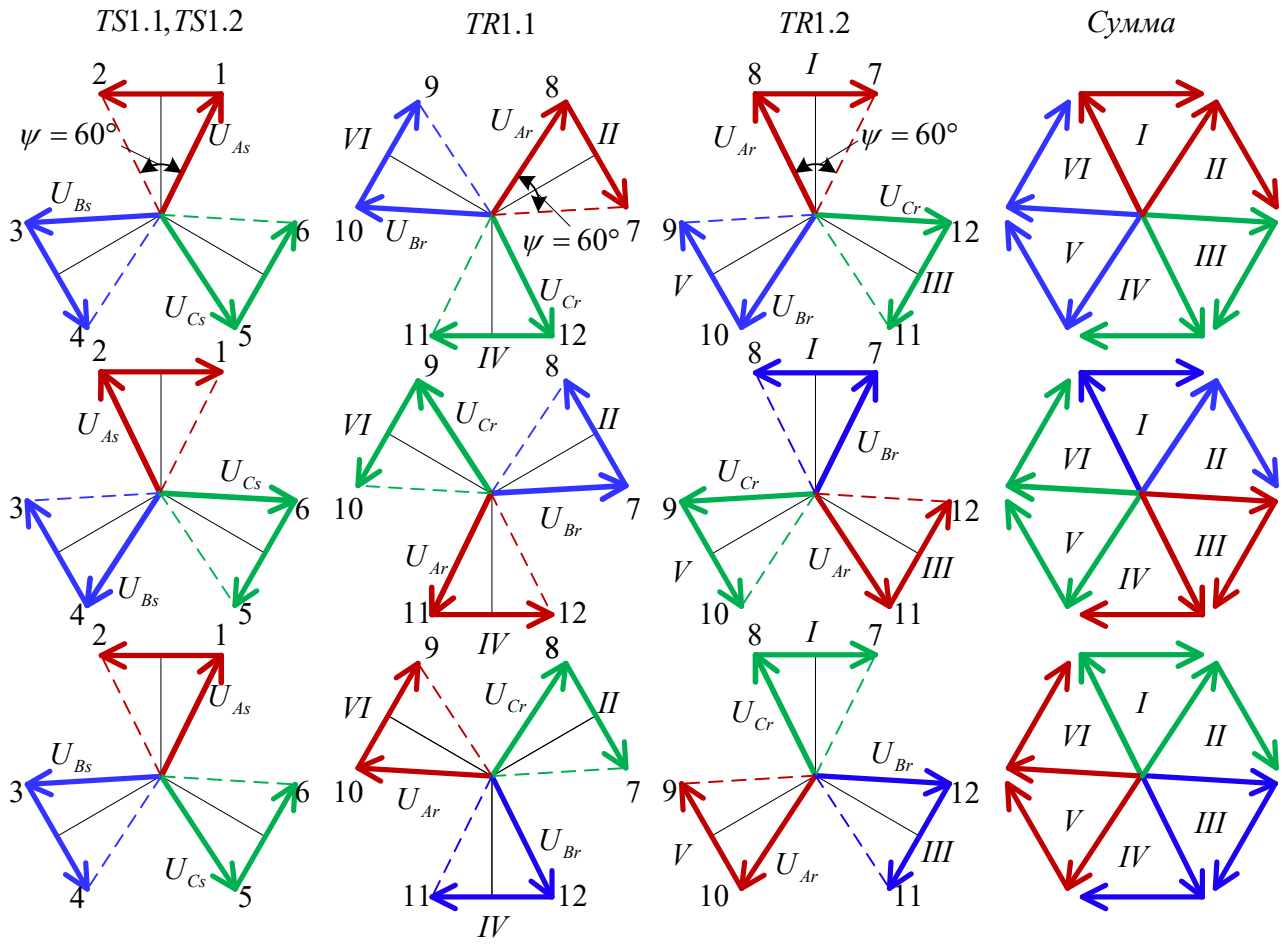


Рис.2.24. Векторная диаграмма работы устройства в процессе одного оборота фазы напряжения

Закон управления силовыми ключами «грубого» регулирования представлен на рис.2.26.

S1	№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	№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	№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	№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	№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	№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.2.26. 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 использовались два варианта секционирования регулировочных обмоток и законов их управления:

Закон управления блоком «тонкого» регулирования с 24 позиционным секционированиеми дискретностью ступени переключения 5°. Схема секционирования и закон управления представлены на рис.1.7 и 1.8 соответственно.

Закон управления блоком «тонкого» регулирования с 48 позиционным секционированием и дискретностью ступени переключения 2,5°. Схема секционирования и закон управления представлены на рис.1.11 и 1.12 соответственно.

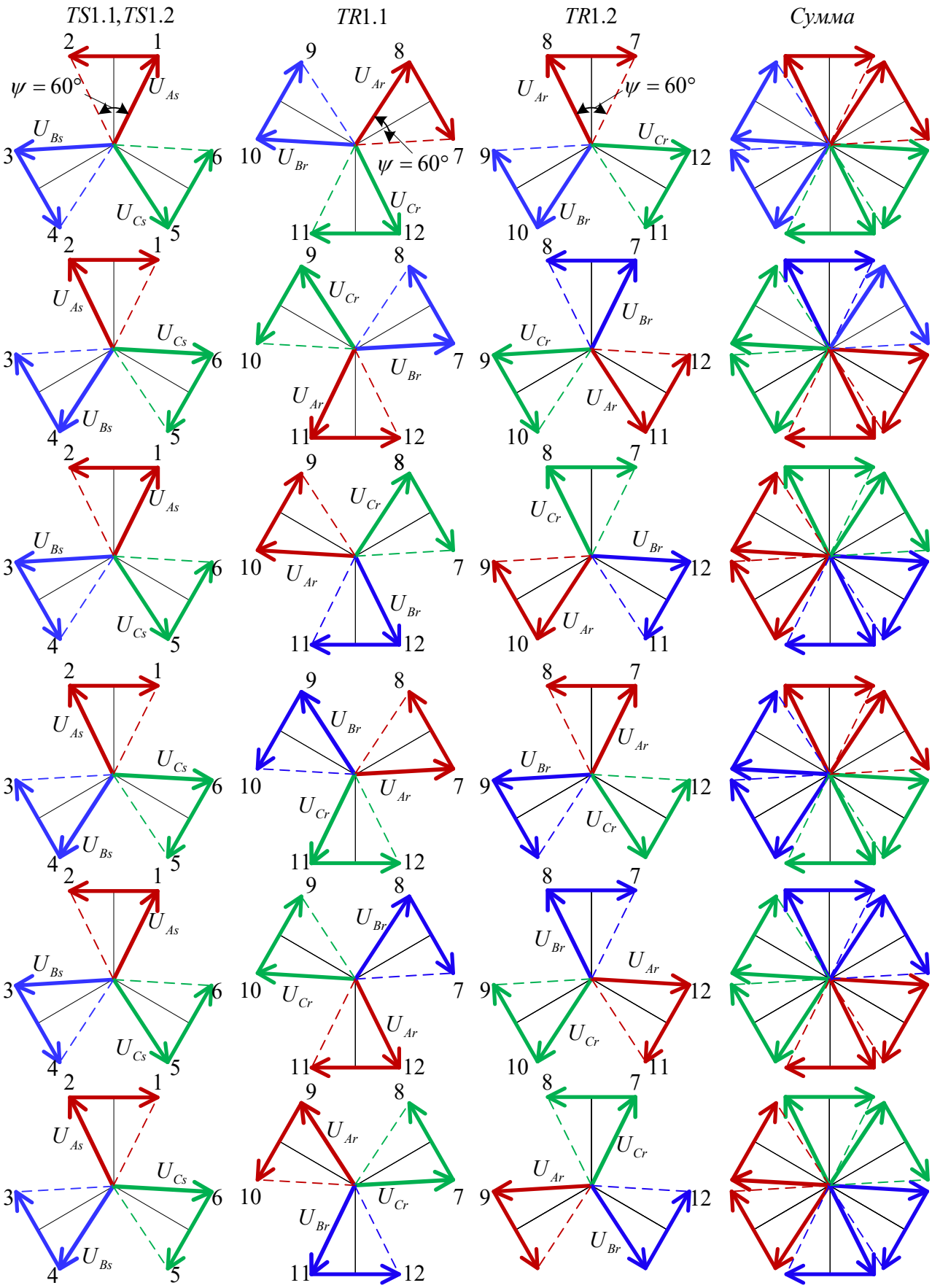


Рис. 2.25. Векторные диаграммы, поясняющие стратегию «грубого» регулирования

Отличительная особенность разработанных схем секционирования обмоток управления заключается в том, что в процессе регулирования количество последовательно включенных

ключей, находящихся в работе всегда остается равным 4–м вне зависимости от позиции переключения, что существенно улучшает показатели надежности системы управления.

Для предложенных схем управления справедливы следующие выражения:

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

Напряжение обмотки управления:

$$U_c = mU_m + nU_n. \tag{2.15}$$

Напряжение секции минимальной дискретности обмотки управления:

$$U_m = \frac{U_c}{m + n(1 + 2m)} = \frac{U_c}{p}. \tag{2.16}$$

Напряжение секции максимальной дискретности обмотки управления:

$$U_n = (1 + 2m)U_m. \tag{2.17}$$

Полное количество ступеней регулирования:

$$q = 1 + 2\left[m + n(1 + 2m)\right]. \tag{2.18}$$

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 $U_s = U_r = 230B$;
- 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 соответственно приняты:60/50Гц, 50/60Гц, 50/49Гц, 50/49,6Гц;
- соотношение мощностей передающей и приемной систем составляло: 1:1; 1:10; 1:100; 1:1000;
- параметры структурно-имитационной модели приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя:

$$U_{SM1} = U_{SN1} = U_{RM1} = U_{RN1} = 133\ B;$$

$$I_{SM1} = I_{SN1} = I_{RM1} = I_{RN1} = 24\,A;$$
$$U_{SM2} = U_{SN2} = U_{RM2} = U_{RN2} = 345\ B;$$
$$I_{SM2} = I_{SN2} = I_{RM2} = I_{RN2} = 7\,A;$$
$$U_{SM3} = U_{SN3} = U_{RM3} = U_{RN3} = 345\ B;$$
$$I_{SM3} = I_{SN3} = I_{RM3} = I_{RN3} = 7\,A;$$
$$U_{SM4} = U_{SN4} = U_{RM4} = U_{RN4} = 57{,}5\ B;$$
$$I_{SM4} = I_{SN4} = I_{RM4} = I_{RN4} = 12\,A;$$
$$U_{SM5} = U_{SN5} = U_{RM5} = U_{RN5} = 57{,}5\ B;$$
$$I_{SM5} = I_{SN5} = I_{RM5} = I_{RN5} = 12\,A.$$

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.

Эксперимент по питанию активной нагрузки через исследуемый преобразователь частоты осуществлялся в соответствии со схемами, приведенными рис.2.27, 2.28.

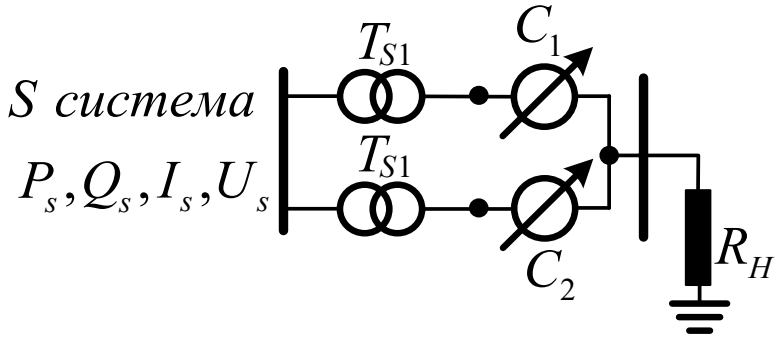


Рис.2.27. Схема работы преобразователя на активную нагрузку

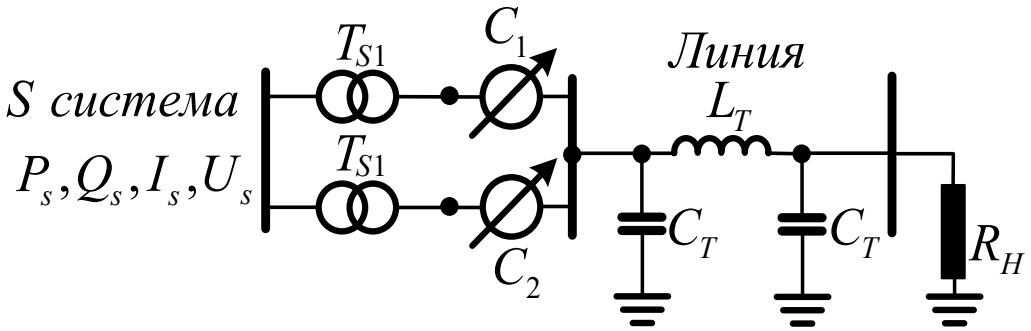
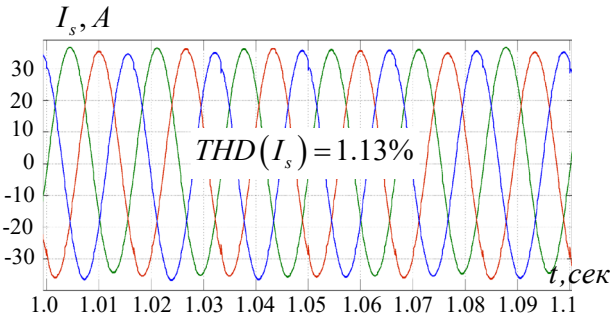
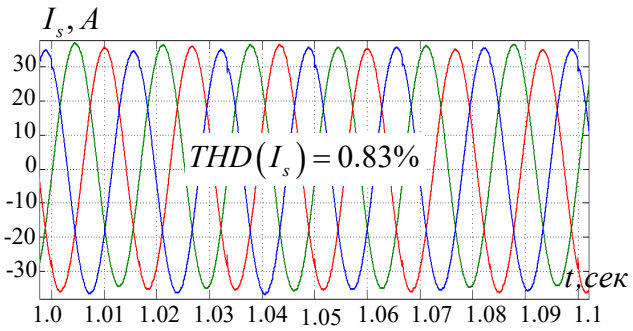


Рис.2.28 Схема работы преобразователя на активную нагрузку через ЛЭП 30°

Результаты расчетных экспериментов приведены в виде осциллограмм на рис.2.29÷2.32 для соотношения частот приемной и передающей систем 60/50Гц. Результаты при использовании 24 позиционного регулирования обозначены буквой «а», для 48 – и позиционного буквой «б» соответственно.

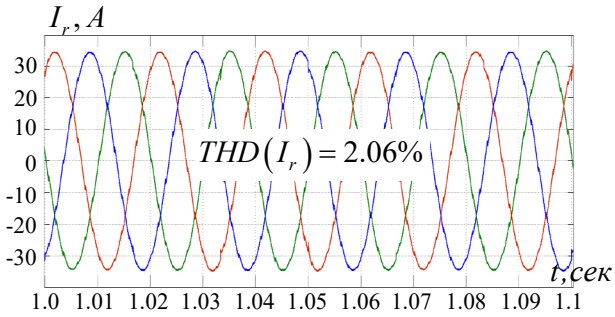


а

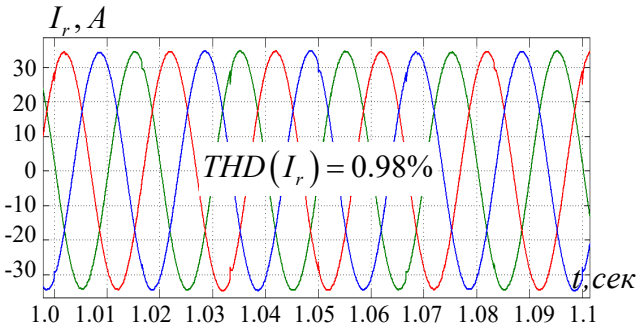


б

Рис.2.29 Осциллограммы токов на передающей I_s системе.

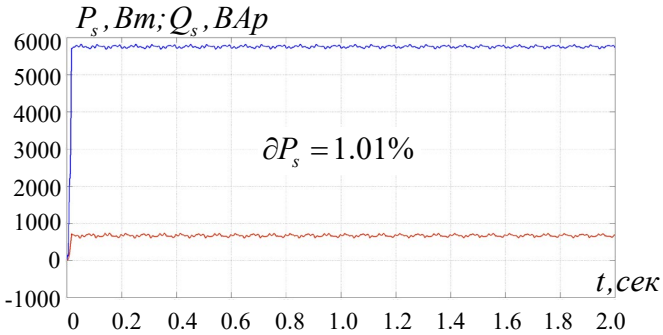


а

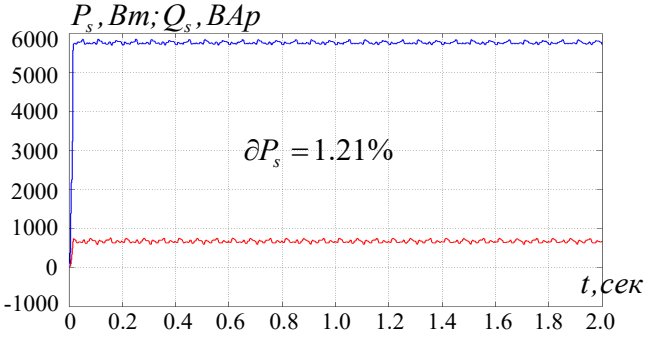


б

Рис.2.30. Осциллограммы токов на приемной I_r системе.

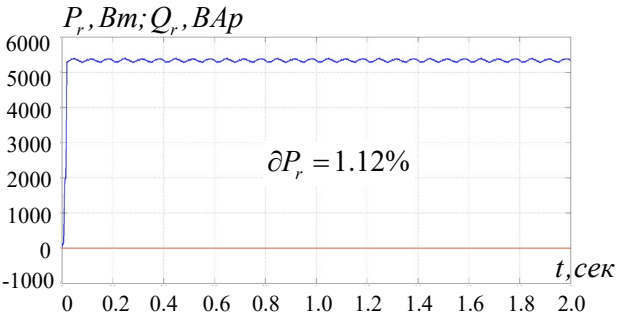


а

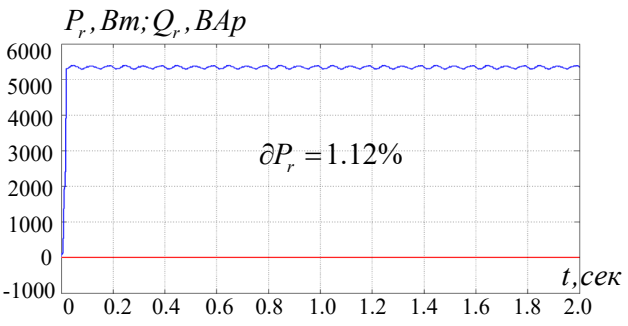


б

Рис.2.31. Активные и реактивные мощности на передающей системе



а



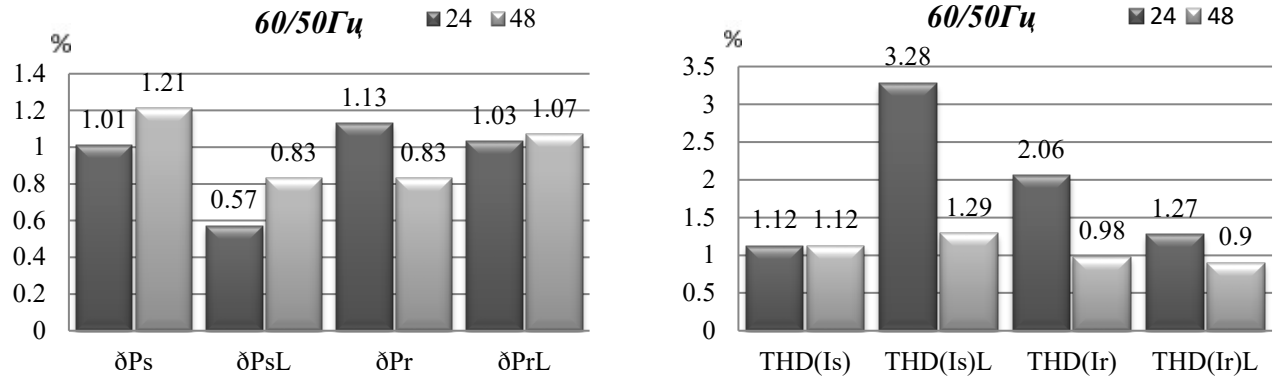
б

Рис.2.32. Активные и реактивные мощности на приемной системе

Результаты, при других соотношениях частот и вариантах присоединения нагрузки, приведены в виде осциллограмм и таблиц в Приложении 9.

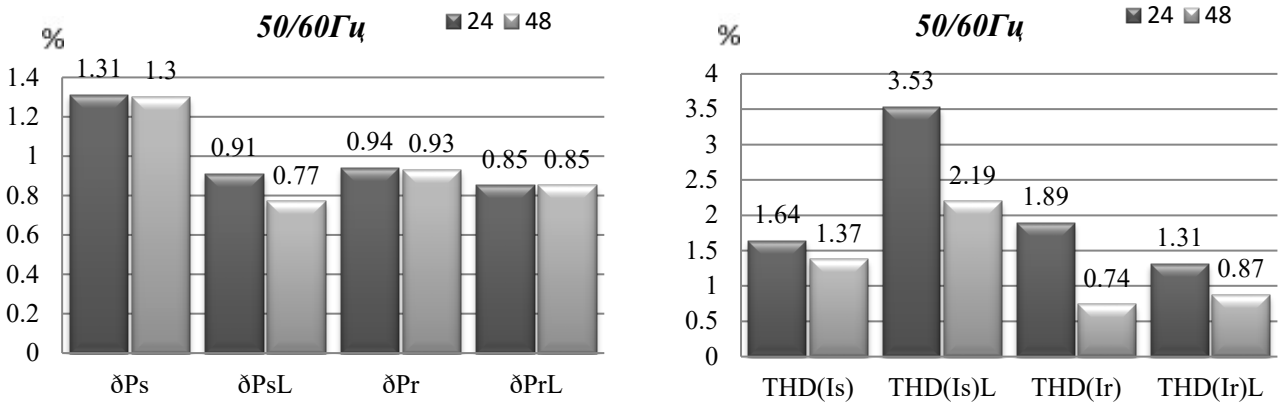
Для проведения сравнительного анализа, в соответствии с данными Приложения 9, построены гистограммы при различных частотах скольжения и способах секционирования обмоток управления, представленные на рис.2.33-2.36. Режимные параметры с индексом «L» соответствуют варианту питания нагрузки по схеме рис.2.30, без индекса – рис.2.29.

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



а б

Рис.2.33.Гистограммы режимных параметров, определяющих качество преобразования при работе устройства на активную нагрузку и соотношении частот 60/50Гц.



а б

Рис.2.34. Гистограммы режимных параметров, определяющих качество преобразования при работе устройства на активную нагрузку и соотношении частот 50/60Гц.

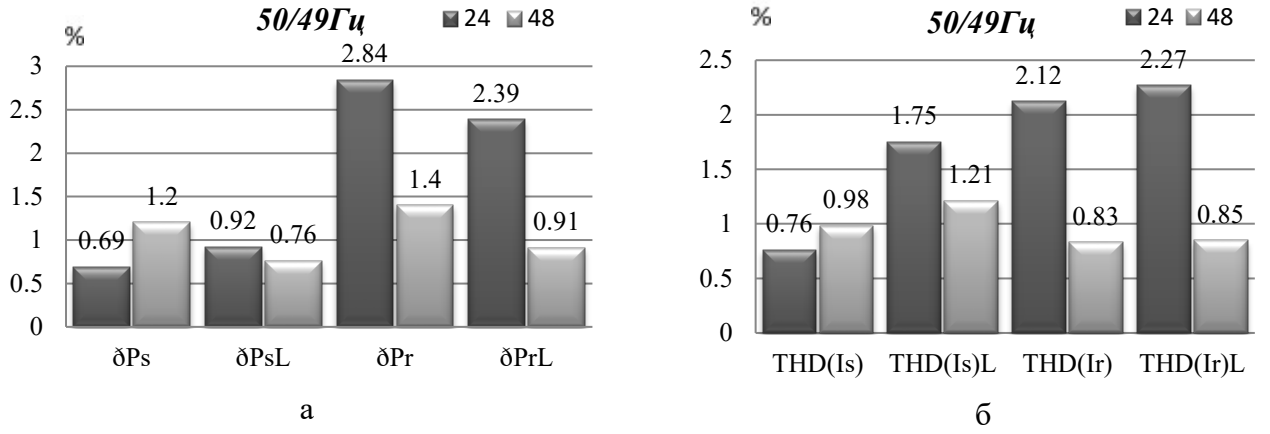
Анализируя результаты расчетных экспериментов в части оценки стабильности передаваемой мощности можно прийти к следующим выводам:

- 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–и позиционного секционирования более эффективно, чем 24–х позиционного. Максимальный эффект наблюдается при частоте скольжения 0,4 и 1Гц. Однако следует отметить, что в этом случае степень стабильности

b

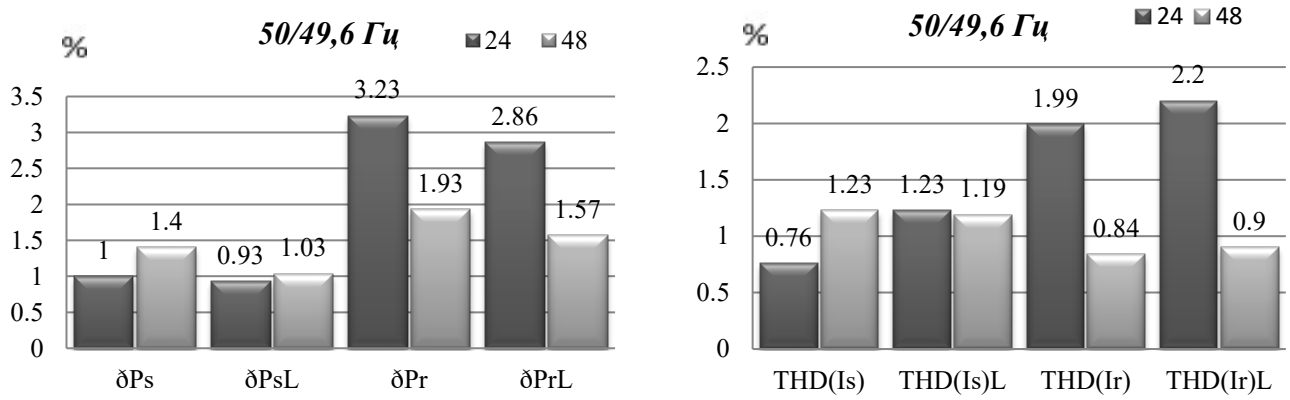
существенно ниже, чем при скольжении в 10Гц. При частоте скольжения 10Гц степени стабильности близки по значению, как при питании нагрузки через ЛЭП, так и без нее;

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



а б

Рис.2.35. Гистограммы режимных параметров, определяющих качество преобразования при работе устройства на активную нагрузку и соотношении частот 50/49Гц



а б

Рис.2.36. Гистограммы режимных параметров, определяющих качество преобразования при работе устройства на активную нагрузку и соотношении частот 50/49,6Гц.

Анализируя значения 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 1Гц. Так же следует отметить, что максимальное значение коэффициента гармонических искажений достигается при передаче мощности с частоты 50Гц на 60Гц;
- подключение нагрузки через ЛЭП приводит к существенному (более чем в два раза) увеличению коэффициентов гармонических искажений токов на передающей системе для 24–х позиционного секционирования. При питании нагрузки через ЛЭП и 48–и позиционном секционировании существенно снижается коэффициент гармонических искажений по сравнению с 24–х позиционным секционированием для всех режимов преобразования. Диапазон снижения может достигать 0,5÷2,0%;

• качество преобразования токов для приемной системы в случае 48–и позиционного секционирования во всех режимах присоединения нагрузки и соотношениях частот лучше 24–х позиционного секционирования. Диапазон снижения коэффициента гармонических искажений токов при 48–и позиционном секционировании может достигать 1,0÷1,3%. Максимальный эффект снижения коэффициента гармонических искажений токов для 48–и позиционного секционирования наблюдается на нагрузке при частоте скольжения 0,4 и 1Гц.

Исследование режимов работы преобразователя на приемную систему через 30–и градусную ЛЭП осуществлялось в соответствии со схемой, представленной на рис.2.37.

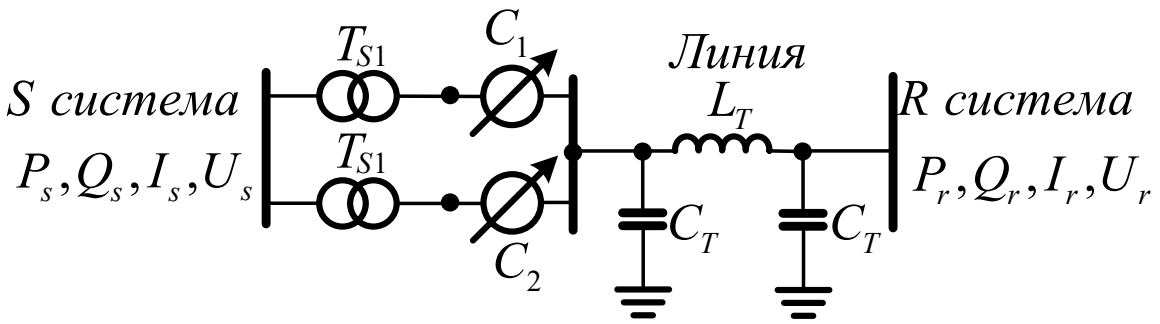


Рис.2.37. Схема проведения эксперимента при работе 2-х канального преобразователя частоты на систему через 30-и градусную ЛЭП

Результаты расчетных экспериментов при 24–х и 48–и позиционном секционировании, разном соотношении частот и мощностей передающей и принимающей систем представлены в виде таблиц в Приложении 9, таблица П9.3÷П9.6. Для сравнительного анализа полученных данных построены графики зависимости режимных параметров при различных соотношениях частот и мощностей передающей и принимающей систем, рис.2.38-2.41.

Анализируя степень 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;

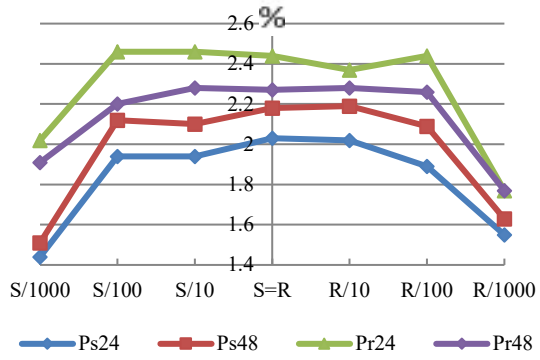
• минимальные значения степени стабильности передаваемой мощности наблюдается при соотношении мощностей 1/1000. Этот факт свидетельствует об эффективности применения исследуемого преобразователя при подключении к энергосистеме небольших источников с нестабильной рабочей частотой, например, ВЭУ;

• степень стабильности передаваемой мощности возрастает при уменьшении частоты скольжения между объединяемыми системами. Так, при частоте скольжения 10Гц диапазон степени стабильности передаваемой мощности, рис.2.38, 2.39, составляет 1,1÷2,5%, а при частоте скольжения 0,4 и 1Гц, рис.2.40, 2.41 – 1,5÷8%;

• при минимальных значениях частоты скольжения, 0,4 и 1Гц, и 48–и позиционном секционировании величина степени стабильности передаваемой мощности существенно ниже, чем для 24–х позиционного секционирования (в 2÷2,5 раза), а при скольжении частоты в 10Гц отличие в величинах степени стабильности передаваемой мощности между вариантами позиционного секционирования не так заметно.

Анализируя значения 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.2.38÷2.40. Исключением является случай при скольжении частоты 0,4Гц, рис.2.41, где значения коэффициента гармонических искажений имеет практически линейный характер и не зависит от соотношения мощностей между объединяемыми системами;



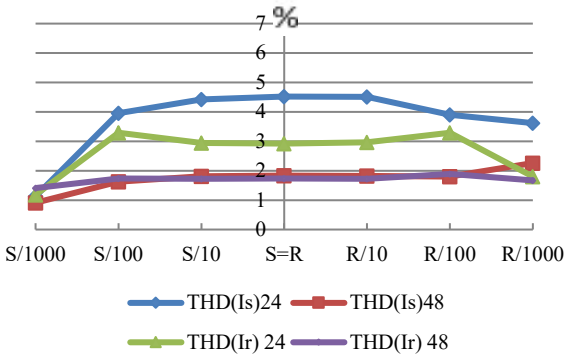
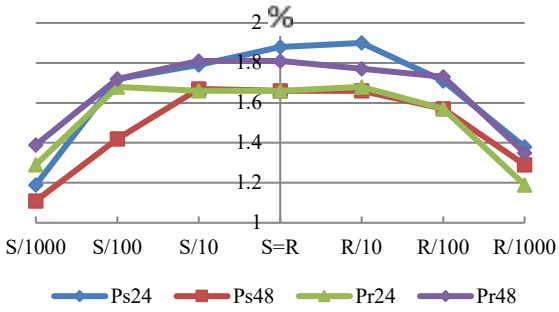


Рис.2.38. Графики режимных параметров, в зависимости от соотношения мощностей передающей $\left(S\left(60Гц\right)\right)$ и принимающей $\left(R\left(50Гц\right)\right)$ систем.



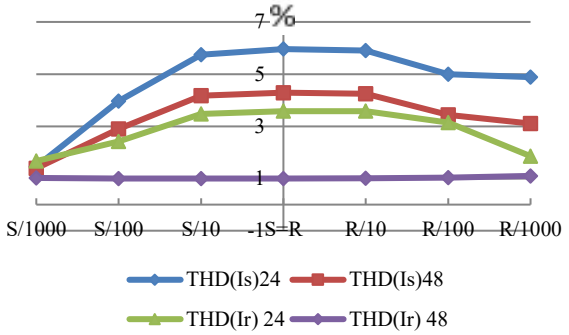
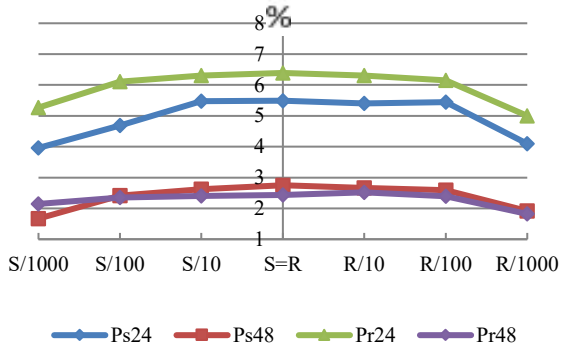


Рис. 2.39. Графики режимных параметров, в зависимости от соотношения мощностей передающей $\left(S\left(50Гц\right)\right)$ и принимающей $\left(R\left(60Гц\right)\right)$ систем.



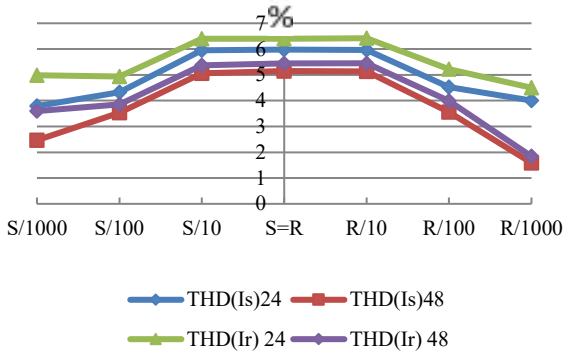
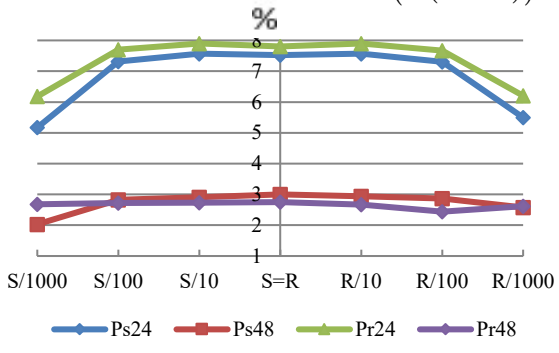


Рис.2.40. Графики режимных параметров, в зависимости от соотношения мощностей передающей $\left(S\left(50Гц\right)\right)$ и принимающей $\left(R\left(49Гц\right)\right)$ систем.



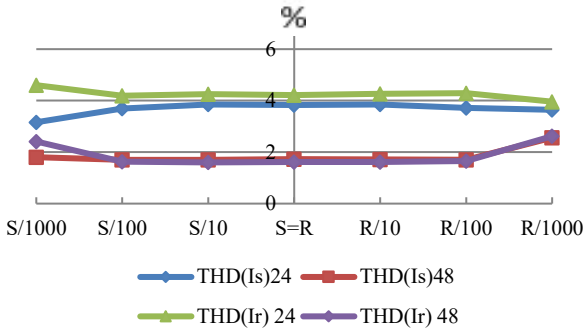


Рис.2.41. Графики режимных параметров, в зависимости от соотношения мощностей передающей $\left(S\left(50Гц\right)\right)$ и принимающей $\left(R\left(49,6Гц\right)\right)$ систем.

- величина коэффициента гармонических искажений по току существенно ниже для 48 позиционного секционирования. Особенно это заметно при малых частотах скольжения, рис. 2.38÷2.41;
- коэффициенты гармонических искажений по току на передающей и принимающей системах при 48–и позиционном секционировании принимают практически равные значения, рис.2.38, 2.40, 2.41.

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–и позиционным секционированием из-за лучших показателей качества преобразования по отношению к 24–х 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 $U_s = U_r = 230B$;
- 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 60/50Гц.;
- 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 $t_{пр}, сек$.

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

В начальный момент времени устройство работает с номинальной мощностью, через время $t_1 = 0,75\,сек$ происходит наброс нагрузки соответствующий 120% перегрузке устройства, при $t_2 = 1,25\,сек$ происходит дополнительный наброс нагрузки, в результате перегрузка устройства составляет 160%. Затем при $t_3 = 1,75\,сек$ происходит сброс нагрузки до номинального уровня передачи. Проведение эксперимента осуществлялось в соответствии со

схемой, представленной на рис.2.27. Результаты проведения эксперимента представлены на осциллограммах мощностей (рис.2.42÷2.43) и токов (рис.2.44÷2.47).

Анализируя осциллограммы, представленные на рис.2.42÷2.47 можно сделать следующие выводы:

- степень стабильности передаваемой мощности при перегрузке устройства в 120% от номинальной мощности остается неизменной, а при 160 % перегрузке увеличивается в два раза и составляет на передающей системе 2,43%, а на приемной системе 2,25% (рис.2.42÷2.43);
- 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.2.48), на шинах исследуемого устройства со стороны приемной системы (рис.П9.15) и на шинах со стороны передающей системы (рис.П9.24) проводилось в следующем порядке. В начальный момент времени устройство работает при номинальном значении передаваемой мощности, через время $t_1 = 0,35\,сек$ возникает трехфазное короткое замыкание и отключается при $t_2 = 0,5\,сек$, в результате асинхронная УМС нарушается, а устройство продолжает работать на нагрузку. В момент времени $t_3 = 0,75\,сек$ происходит восстановление асинхронной УМС, при $t_4 = 1,25\,сек$ происходит наброс нагрузки, а в момент $t_5 = 1,75\,сек$ сброс нагрузки до номинального уровня передачи.

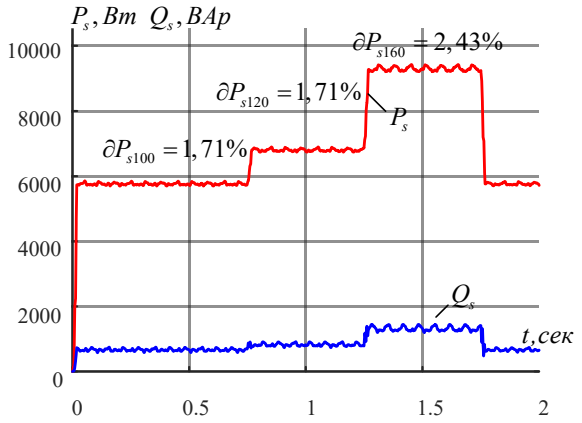


Рис.2.42. Мощности на передающей системе в момент наброса и сброса нагрузки

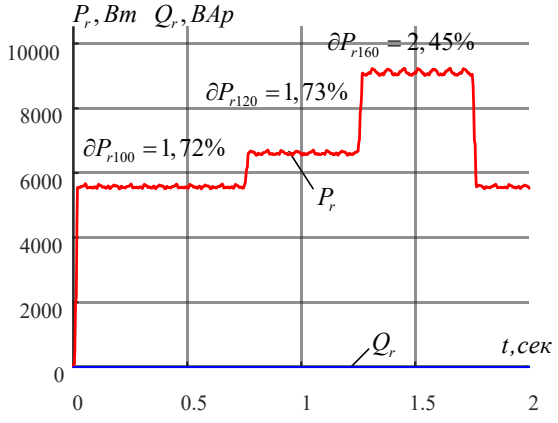


Рис.2.43. Мощности на приемной системе в момент наброса и сброса нагрузки

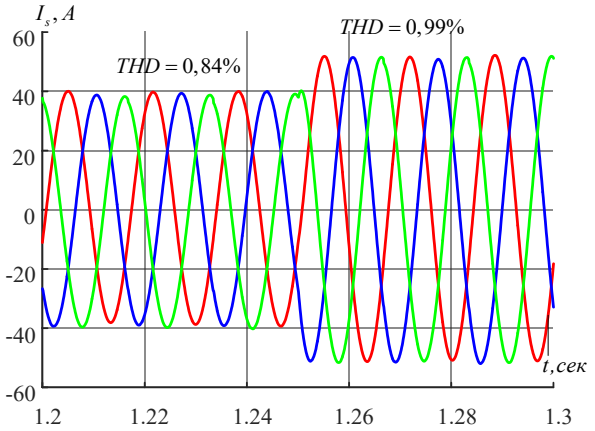


Рис.2.44. Ток на передающей системе в момент наброса нагрузки

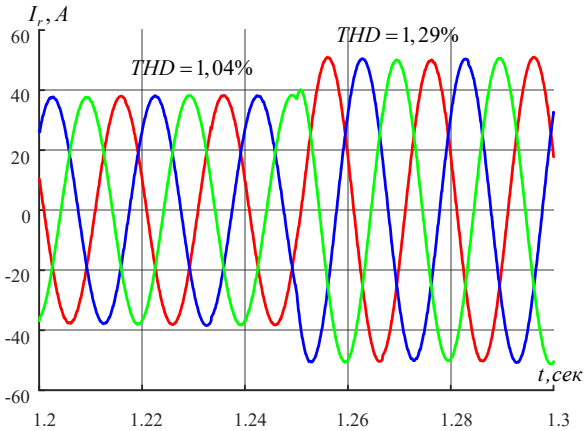


Рис.2.45. Ток на приемной системе в момент наброса нагрузки

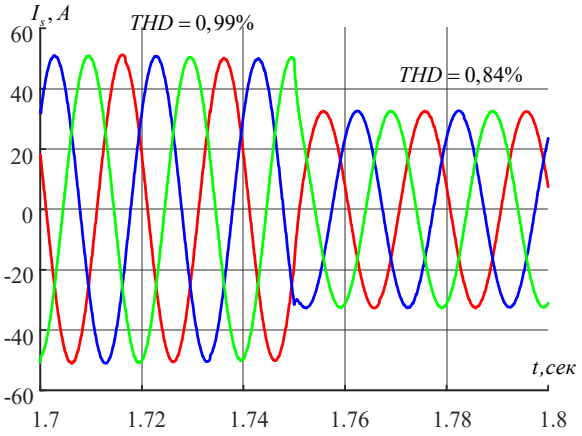


Рис.2.46. Ток на передающей системе в момент сброса нагрузки

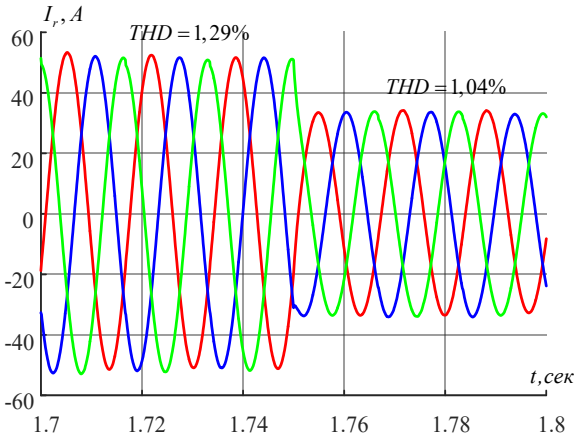


Рис.2.47. Ток на приемной системе в момент сброса нагрузки

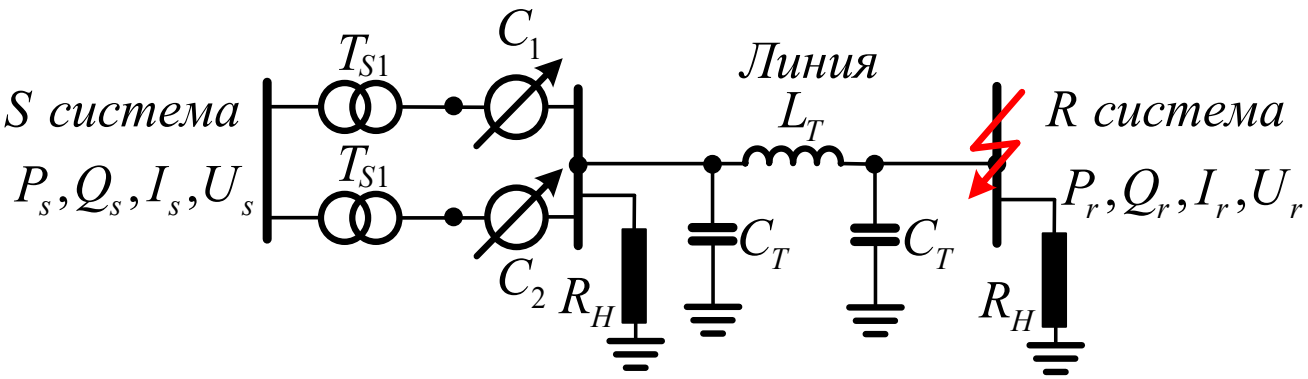


Рис.2.48. Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах приемной системы

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.2.49÷2.54 и 2.55÷2.56 соответственно.

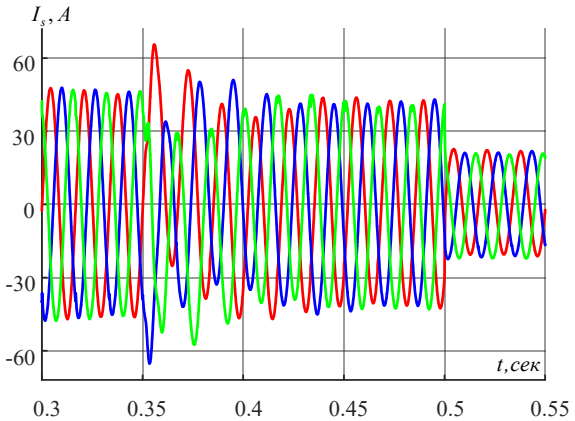


Рис.2.49. Ток на передающей системе в момент возникновения и отключения КЗ

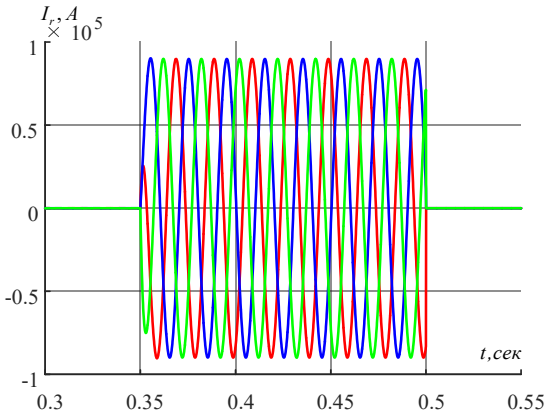


Рис.2.50. Ток на приемной системе в момент возникновения и отключения КЗ

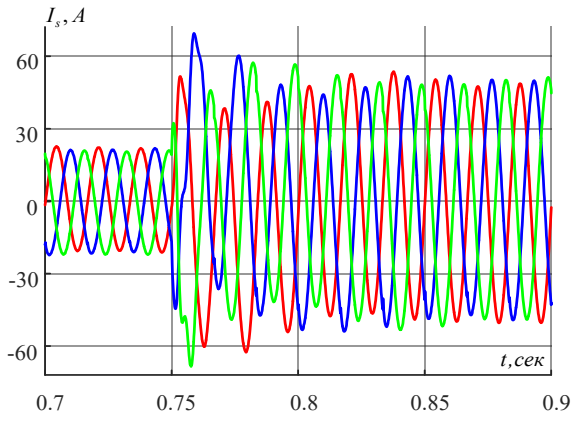


Рис.2.5.1Ток на передающей системе в момент восстановления асинхронной УМС

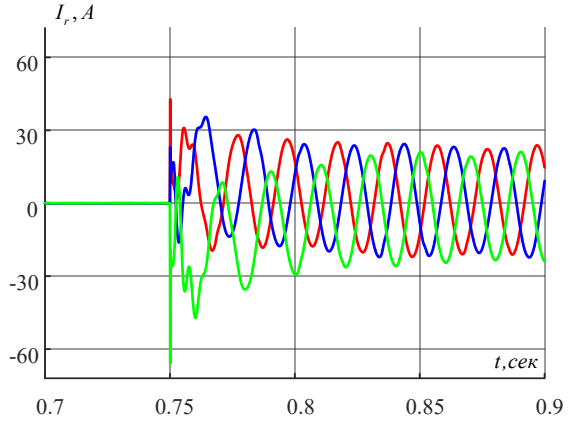


Рис.2.52. Ток на приемной системе в момент восстановления асинхронной УМС

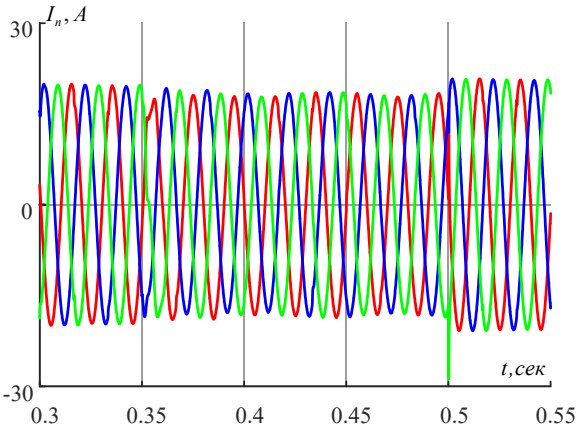


Рис.2.53. Токи на нагрузке в момент возникновения короткого замыкания

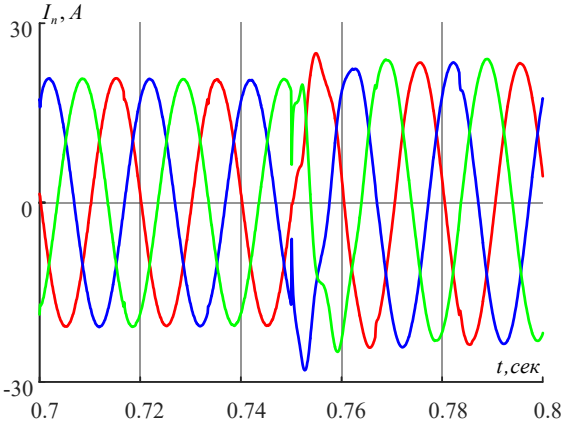


Рис.2.54. Токи на нагрузке в момент восстановления асинхронной УМС

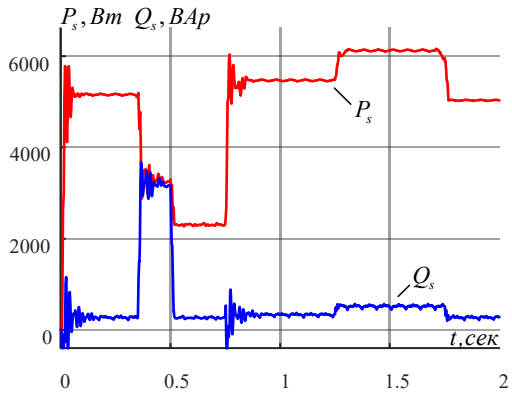


Рис.2.55. Мощности на передающей системе при проведении этапов моделирования

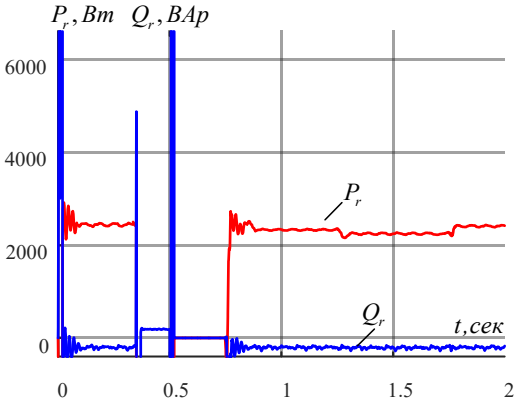


Рис.2.56. Мощности на приемной системе при проведении этапов моделирования

Результаты вычислительных экспериментов при возникновении короткого замыкания на шинах исследуемого устройства со стороны приемной системы приведены в Приложении 9 в виде осциллограмм токов и мощностей на рис.П9.16÷П9.23, а со стороны передающей системы на рис.П9.25÷П9.32.

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

0,1сек обеспечивает завершение всех переходных процессов без применения каких либо средств управления с отклонением мощности не превышающих 2,5 % от выбранного режима, а частота изменяется от 0 до 0,25Гц/сек;

- при значительных отклонениях от нормального режима работы сети, таких как отклонение напряжения, частоты или близкое повреждение, устройство после отключения повреждения восстанавливает режим, в течение 0,15сек и стабилизирует уровень передаваемой мощности.

2.5.УМС на базе преобразователя, выполненного по схеме «шестиугольник».

Принципиальная схема и принцип работы устройства

Принципиальная электрическая схема объекта исследования представлена на рис.2.57. 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 2.4.

Статический преобразователь, представленный на рис.2.57, состоит из двух однофазных трехобмоточных трансформаторов, на фазу соединенных по схеме «шестиугольник». Первичными обмотками каждого однофазного трансформатора являются обмотки управления $W_У^{'}, W_У^{''}$. Начала указанных обмоток подключаются к передающей и приемной системам соответственно. Концы обмоток подключены к середине вторичных обмоток соответствующих трансформаторов $W^{'}$, $W^{''}$. Начала третичных обмоток двух однофазных трансформаторов каждой фазы соединены между собой, а концы – к нулевой точке образуя схему «звезда».

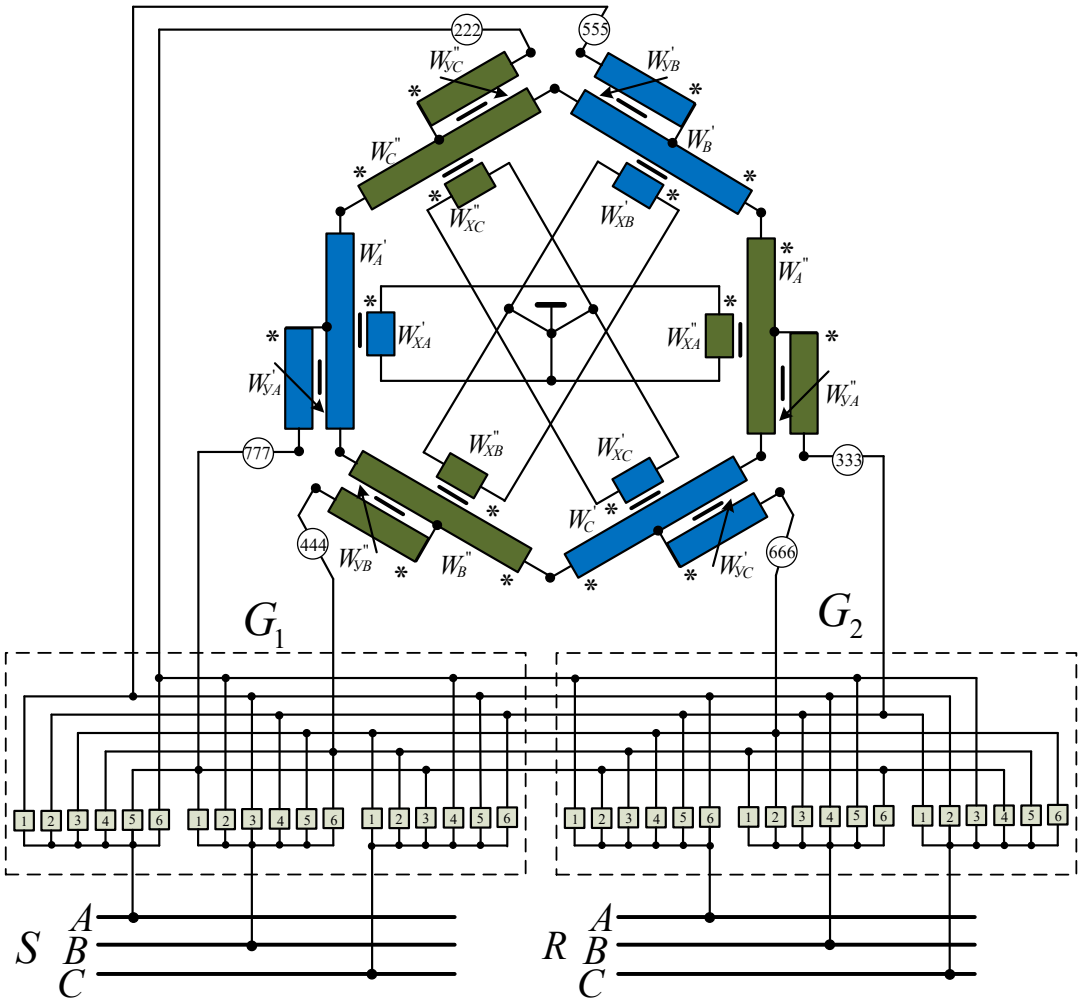


Рис.2.57. Электрическая схема статического преобразователя частоты, выполненного по схеме «шестиугольник»

Обмотки управления являются средством «тонкого» регулирования и, благодаря силовым ключам, обеспечивают фазовый сдвиг напряжения в диапазоне ±30°, 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. При этом обеспечивается одновременная работа двух многообмоточных однофазных трансформаторов в каждой фазе. Как следствие, в одной фазе одновременно в работе находятся две обмотки «тонкого» регулирования, позволяющие обеспечить 120° фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением. В результате срабатывания ключей «грубого» управления обмотки «тонкого» регулирования возвращаются в исходное состояние относительно напряжения сдвинутого по фазе на угол 120°.

Процесс кругового вращения фазы выходного напряжения можно проиллюстрировать на примере работы фазы «А» (рис.2.58).

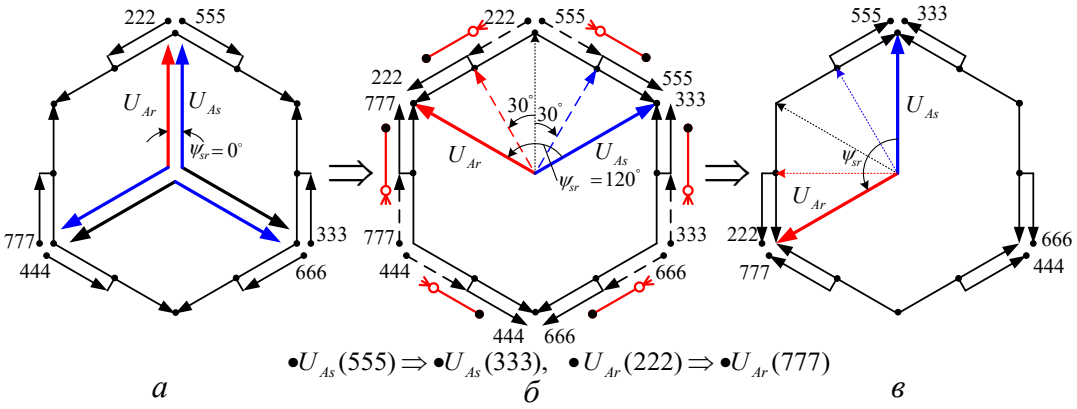
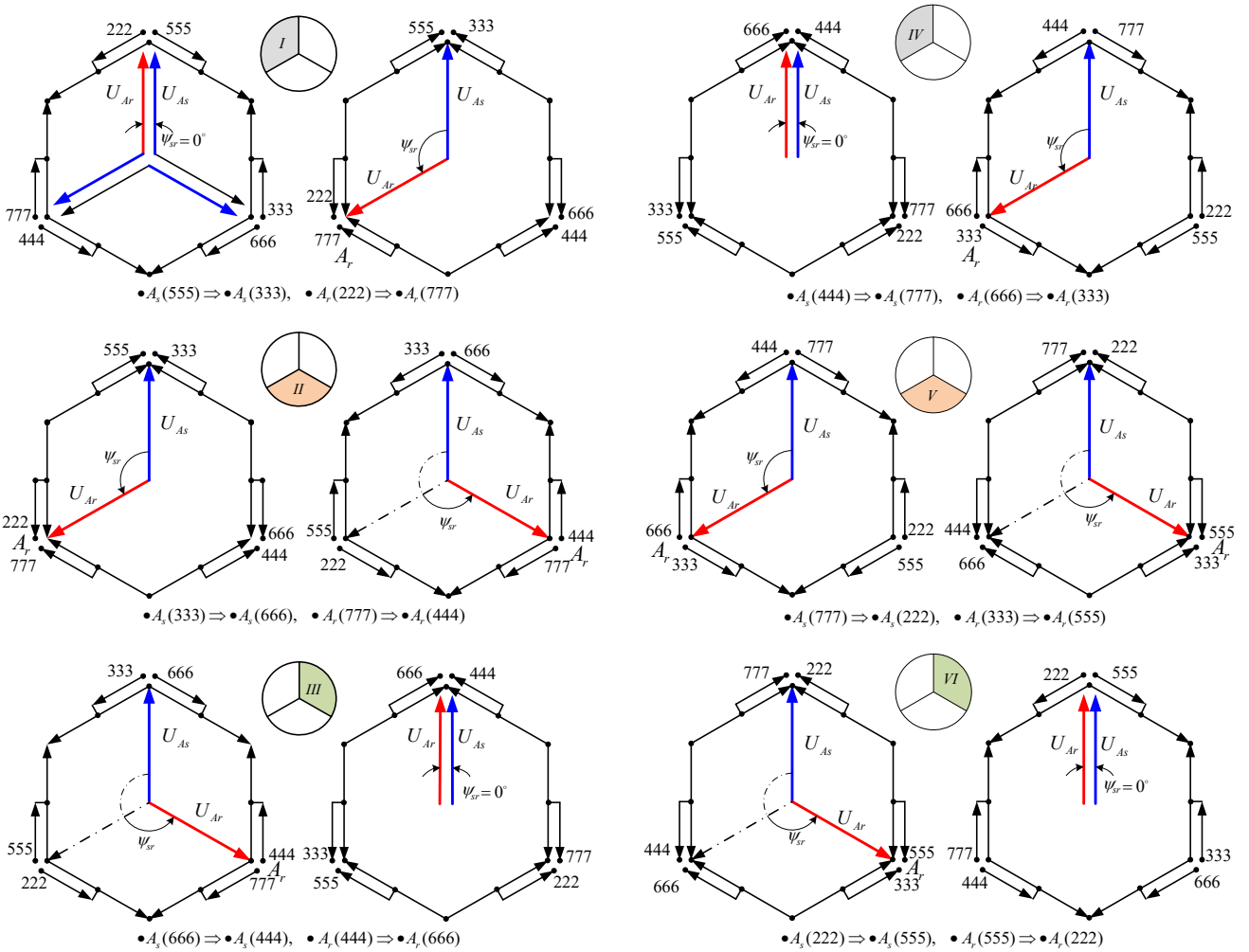


Рис.2.58. Векторная диаграмма напряжений первого сектора «грубого» управления
а – исходное состояние устройства; б – процесс обеспечения угла фазового сдвига;
в – окончание процесса фазового сдвига и срабатывание ключей «грубого» управления.

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.2.58а. В соответствии с ранее описанным в пункте 1.2 законом «тонкого» управления, обмотки регулирования 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.2.58б.

После окончания цикла «тонкого», отрабатывают силовые ключи «грубого» управления. В результате их действия, устройство выполняет поворот на угол 60°, рис.2.58в, 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.2.59а, 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.

После окончания работы устройства в III секторе выходное напряжение U_{Ar} относительно входного U_{As} совершает поворот 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 выходное напряжение U_{Ar} совершит второй оборот на 360° относительно входного напряжения U_{As}, рис.2.59б.



а б

Рис.2.59. Векторная диаграмма, поясняющая закон «грубого» управления

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

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

- расчетное время моделирования $t = 2$ секунды;
- напряжение приемной и передающей систем $U_s = U_r = 230B$;
- 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 60/50Гц;

Параметры структурно-имитационной модели двухканального преобразователя частоты приняты с учетом возможности создания лабораторного образца преобразователя:

- $U'_A = U''_A = U'_B = U''_B = U'_C = U''_C = 230\ B$ – напряжение первичной обмотки;
- $I'_A = I''_A = I'_B = I''_B = I'_C = I''_C = 24A$ – ток первичной обмотки;
- $U'_{XA} = U''_{XA} = U'_{XB} = U''_{XB} = U'_{XC} = U''_{XC} = 115\ B$ – напряжение вторичной обмотки;

- $I'_{XA} = I''_{XA} = I'_{XB} = I''_{XB} = I'_{XC} = I''_{XC} = 12\ A$ – ток вторичной обмотки;
- $U'_{YA} = U''_{YA} = U'_{YB} = U''_{YB} = U'_{YC} = U''_{YC} = 115\ B$ – 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.2.60.

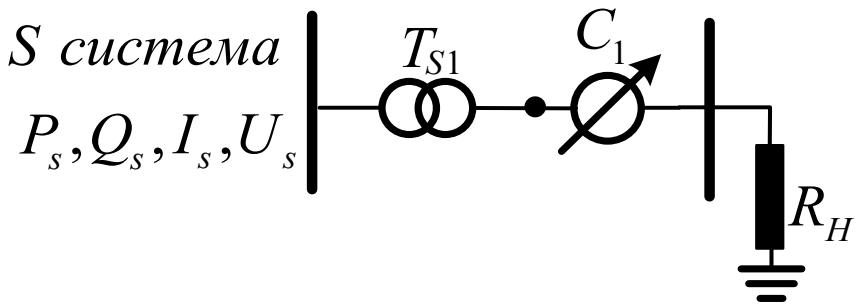


Рис.2.60. Схема проведения эксперимента

Результаты расчетных экспериментов приведены в виде осциллограмм мощностей и токов на передающей и приемной системе при 24–х позиционном секционировании обмотки «тонкого» управления представлены на рис.2.61 и 2.62, а при 48–и позиционном секционировании на рис.2.63 и 2.64.

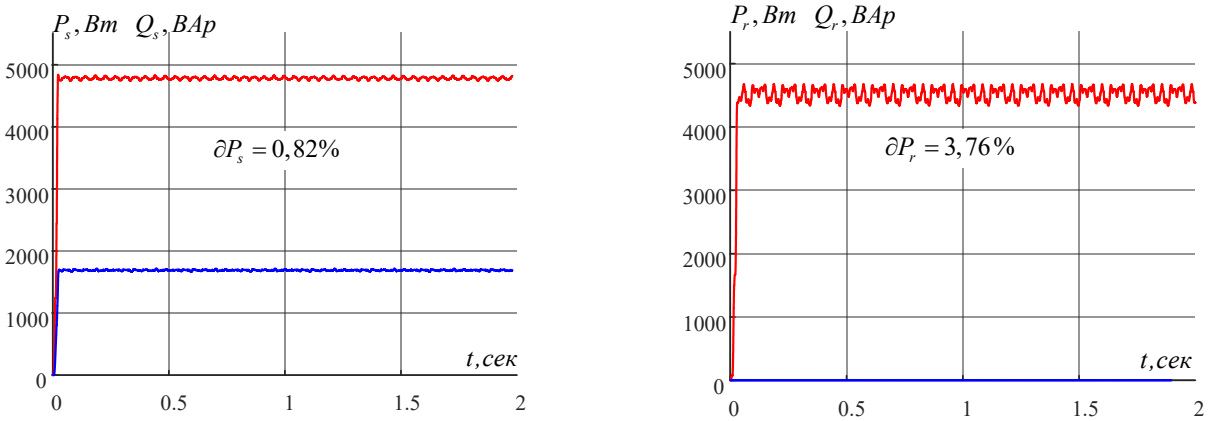


Рис.2.61. Мощности на передающей и приемной системах при 24–х позиционном секционировании

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.

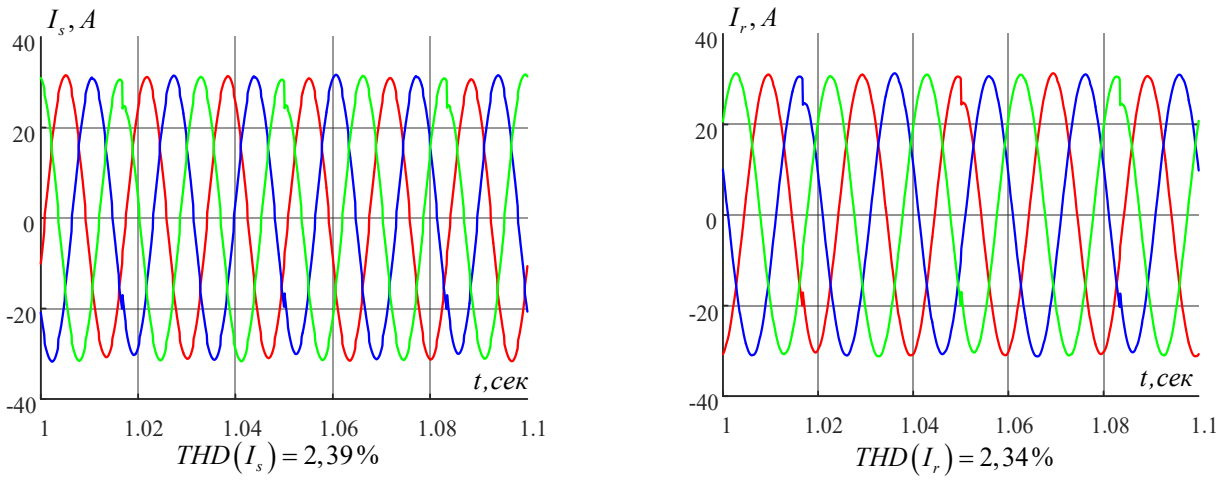


Рис.2.62. Токи на передающей и приемной системах при 24–х позиционном секционировании.

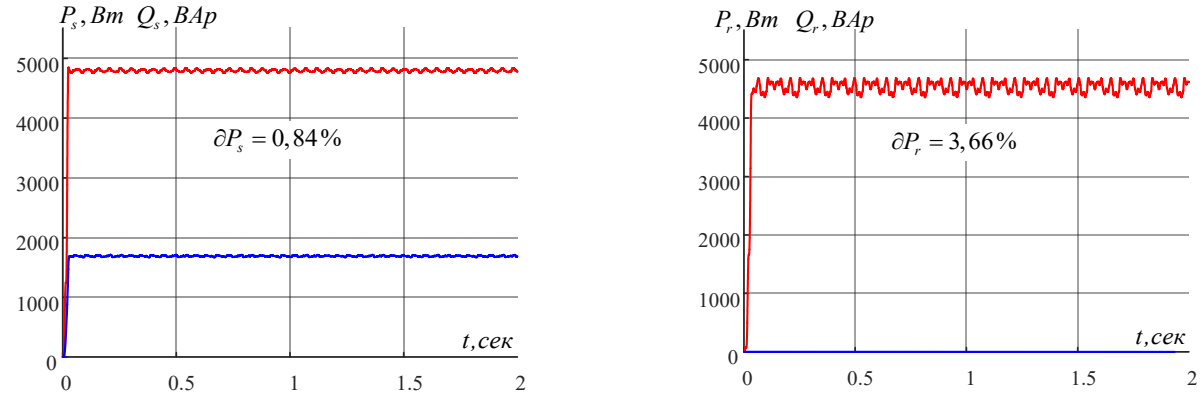


Рис.2.63.Мощности на передающей и приемной системах при 48–и позиционном секционировании.

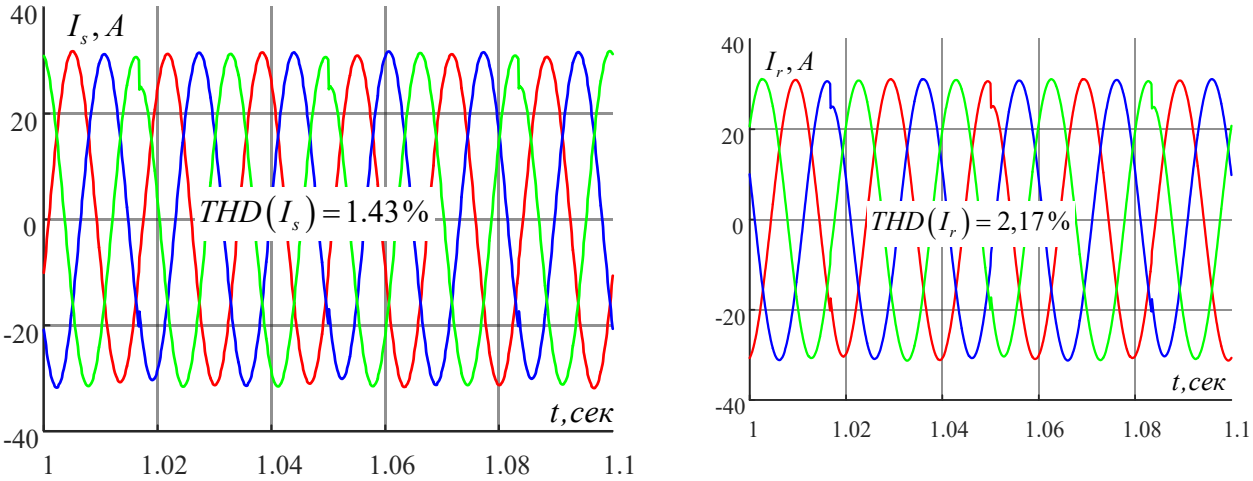


Рис.2.64. Токи на передающей и приемной системах при 48–и позиционном секционировании.

Режимы работы многоканальных преобразователей

Для организации работы многоканальных преобразователей были разработаны согласующие трансформаторы, принципиальные схемы которых с вариантами подключения каналов приведены на рис.2.65 и 2.66 для двух и четырехканальных устройств соответственно.

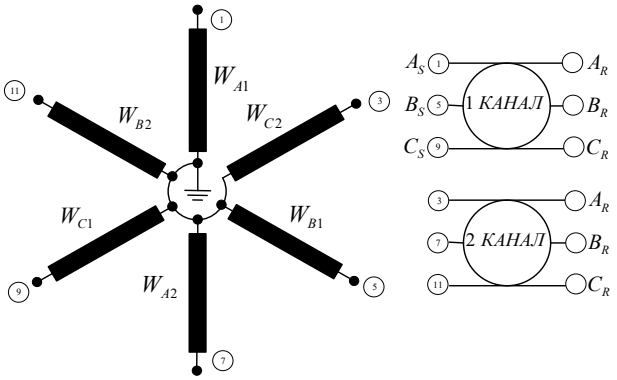


Рис.2.65. Согласующий трансформатор для двухканального преобразователя

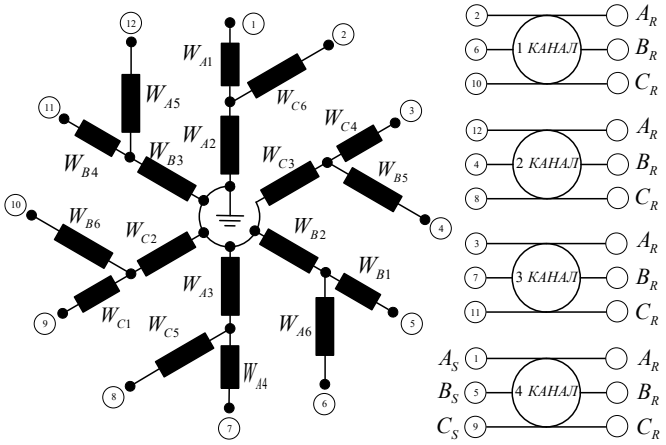


Рис.2.66. Согласующий трансформатор для четырехканального преобразователя

Для построения структурно-имитационных моделей обмотки согласующих трансформаторов рассчитаны на ток 48А, при двухканальной схеме, и на ток 96А, при четырехканальной схеме использования преобразователя. Согласующие трансформаторы позволяют при двухканальной схеме устройства обеспечивать 60°, а при четырехканальной схеме 30° сдвиг между каналами. Предполагается, что фазовый сдвиг между каналами устройства даст возможность улучшить характеристики преобразования по току, а также повысить степень стабильности передаваемой мощности при работе устройства в составе УМС.

Для обеспечения работы устройства в многоканальном режиме законы «тонкого» управления для 24–х и 48–и позиционного секционирования соответствуют количеству каналов с указанием исходных положений силовых ключей и представлены на рис.2.67 и 2.68 соответственно. Закон «грубого» управления при организации многоканальных схем не претерпевает изменений.

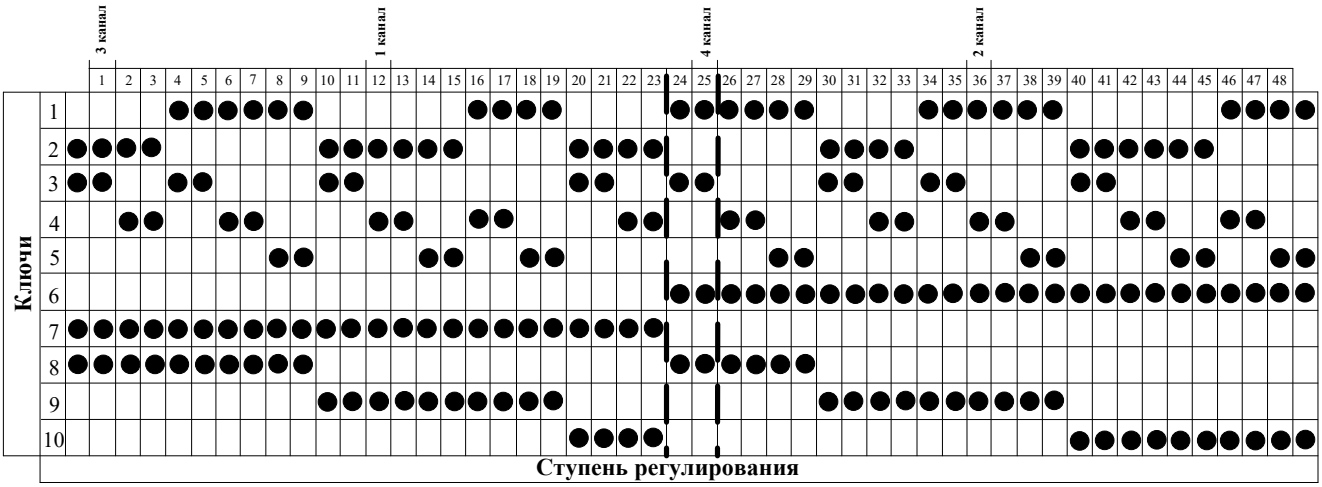


Рис.2.67. Закон управления преобразователем с дискретностью ступени 5°

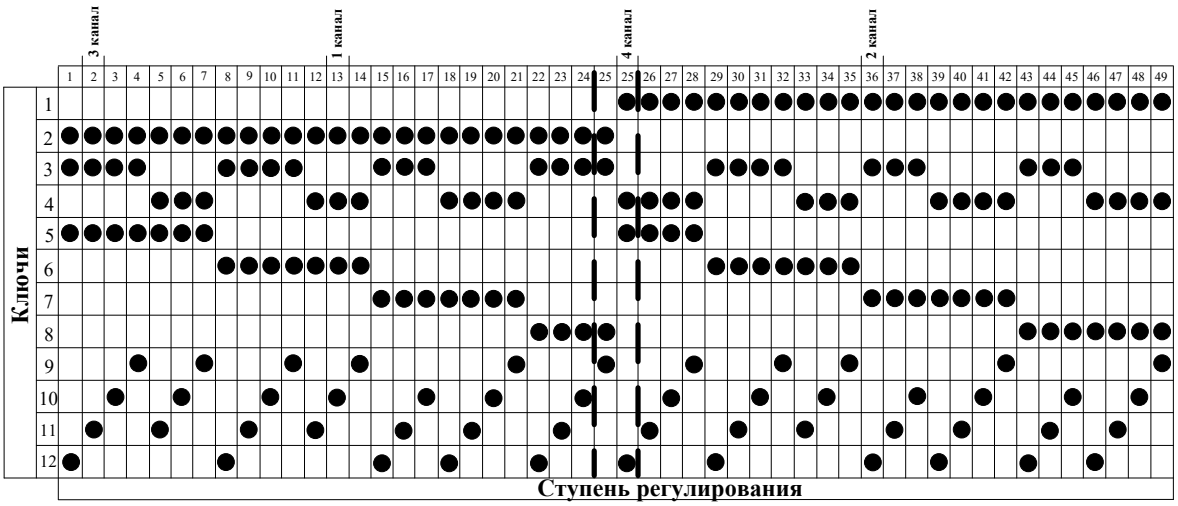


Рис.2.68. Закон управления преобразователем с дискретностью ступени 2,5°

Для исследования режимов работы многоканальных преобразователей был выполнен ряд вычислительных экспериментов:

- работа в двухканальном режиме при 24–х и 48–и позиционном секционировании и уровнем передаваемой мощности соответствующей 100%, 65% и 30% номинальной мощности устройства ($I_{ном} = 48\ A$);
- работа в четырехканальном режиме при 24–х и 48–и позиционном секционировании и уровнем 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 $U_s = U_r = 230B$;
- 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 60/50Гц;
- 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 выше;

Для оценки качества преобразования частоты и передачи мощности использовались 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.

По результатам проведения экспериментов получены осциллограммы мощностей и токов на передающей и приемной системах, которые приведены в Приложении 10 на рис.П10.1÷П10.24, результаты обработки которых, а режимные параметры сведены в таблицы 2.1и 2.2.

Таблица2.1 Работа преобразователя частоты в двухканальном режиме

Количество позиций	*∂Ps,%*	*THD(Is) ,%*	*∂Pr,%*	*THD(Ir) ,%*
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 2.2 Работа преобразователя частоты в четырехканальном режиме

Количество позиций	*∂Ps,%*	*THD(Is) ,%*	*∂Pr,%*	*THD(Ir) ,%*
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

Гистограммы, построенные по данным таблиц 2.1 и 2.2, 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.

Анализ построенных гистограмм позволяет сделать следующие выводы:

- степень стабильности передаваемой мощности на передающей *(∂Ps)* системе указывает на преимущество двухканальной схемы по отношению к четырехканальной. На приемной *(∂Pr)* системе результат носит противоположный характер и указывает на целесообразность применения четырехканальной схемы. Степени стабильности передаваемой мощности на передающей *(∂Ps)* и приемной (*∂Pr*) системах при 24–х и 48–и позиционном секционировании отличаются незначительно (рис.2.69);
- 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.2.70, при 48–и позиционном секционировании, коэффициент гармонических искажений токов в два раза меньше по отношению к 24–х позиционному;
- величина коэффициента гармонических искажений токов на приемной $THD(I_r)$ системе также указывает на преимущество 48–и позиционного секционирования при двухканальном исполнении устройства, но не столь значительно, как на передающей системе, (рис.2.70);
- величина коэффициента гармонических искажений токов на передающей системе $THD(I_s)$ при 48–и позиционном секционировании указывает на то, что качество преобразования не зависит от количества каналов и от уровня передаваемой мощности через устройство. На приемной системе $THD(I_r)$ при 48–и позиционном секционировании, 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–и позиционным секционированием обмотки управления.

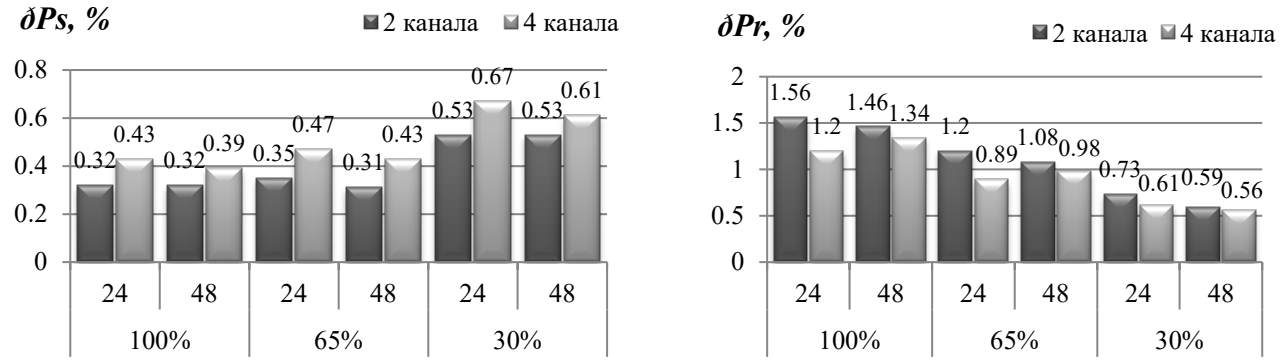


Рис.2.69. Гистограммы степеней стабильности передаваемой мощности на передающей *(ðPs)* и приемной *(ðPr)* системах в зависимости от количества каналов и уровня передаваемой мощности через устройство при двух вариантах закона управления

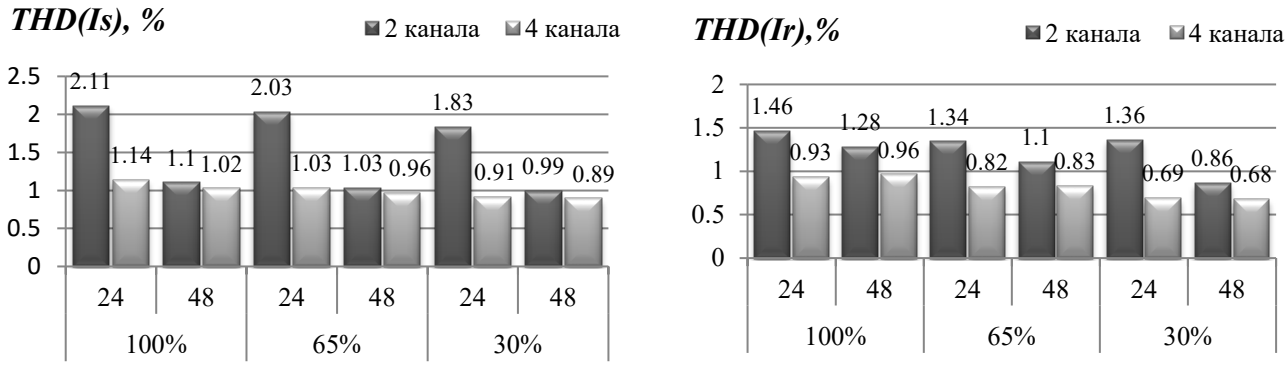


Рис.2.70. Гистограммы коэффициентов гармонических искажений тока на передающей $(THD(I_s))$ и приемной $(THD(I_r))$ системах в зависимости от количества каналов и уровня передаваемой мощности через устройство при двух вариантах закона управления

Исследование характерных режимов работы устройства в составе УМС

Исследование характерных режимов работы устройства выполнялось на основе структурно-имитационной модели преобразователя с 48–и 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 и передающей систем.

При проведении вычислительных экспериментов соблюдались следующие условия:

- расчетное время моделирования $t = 2$ секунды;
- напряжение приемной и передающей систем $U_s = U_r = 230B$;
- 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 60/50Гц;
- 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 $t_{пр},сек$.

Эксперимент при коротком замыкании на одном из каналов проводился по следующему сценарию:

- в момент времени $t_1 = 0,8\,сек$ возникает трехфазное короткое замыкание на втором канале устройства;
- время $t_2 = 1\,сек$, соответствует времени отключения поврежденного канала коммутационными аппаратами и устройство переходит в трехканальный режим работы;
- при наступлении времени $t_3 = 1,6\,сек$ устройство переходит в двухканальный режим работы.

Эксперимент выполнялся при соблюдении уровня передаваемой мощности соответствующего 100% и 65% от номинальной мощности преобразователя, при работе устройства на активную нагрузку (рис.2.71а) и через 30° ЛЭП при обеспечении асинхронной УМС (рис.2.71б) переменного тока.

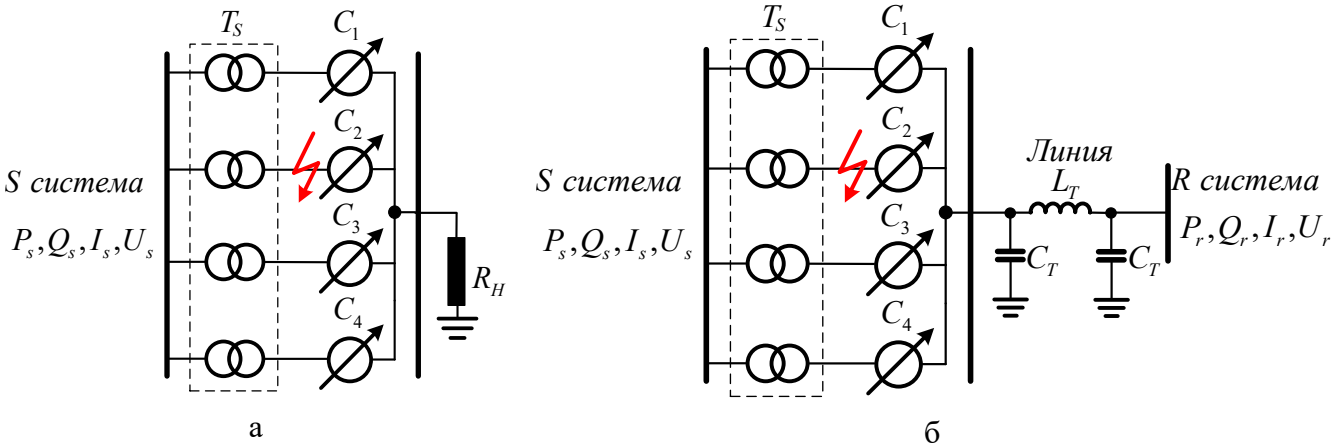


Рис.2.71. Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на одном из каналов
а – при работе устройства на активную нагрузку; б – при работе устройства через 30° ЛЭП при связи двух асинхронно работающих систем

Осциллограммы уровня передаваемых мощностей во время работы устройства при различном количестве одновременно работающих каналов приведены в Приложении 10 на рис.П10.25÷П10.28 при работе устройства на активную нагрузку, а на рис. П10.29÷П10.32 через 30° ЛЭП при обеспечении асинхронной УМС переменного тока.

Гистограммы, характеризующие результаты экспериментов, проводимых согласно схемам рис.2.71, при работе устройства на активную нагрузку представлены на рис.2.72 и 2.73, а через 30° ЛЭП при обеспечении асинхронной УМС на рис. 2.74 и 2.75.

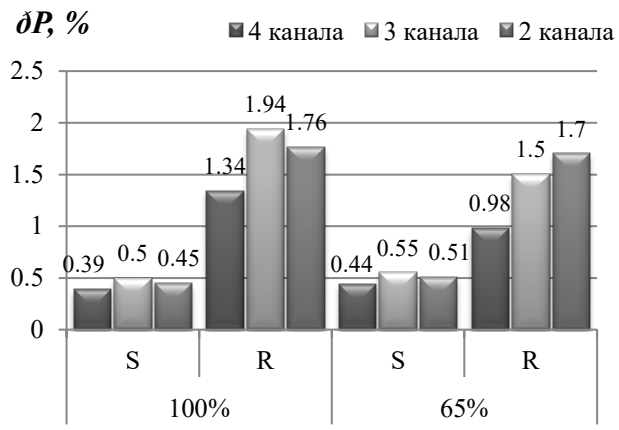


Рис.2.72. Гистограмма степеней стабильности передаваемой мощности на передающей и приемной системах при работе устройства на активную нагрузку

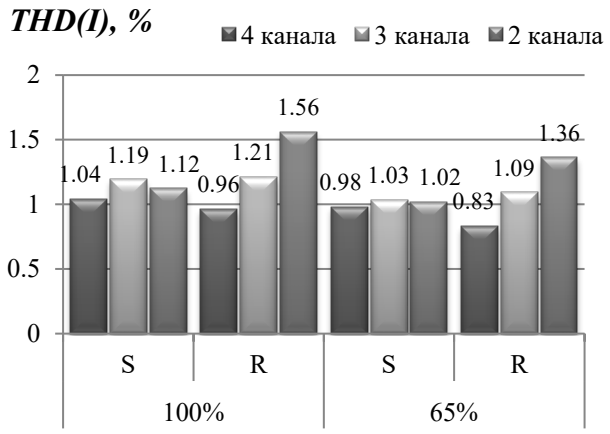


Рис.2.73. Гистограмма коэффициентов гармонических искажений тока на передающей и приемной системах при работе устройства на активную нагрузку

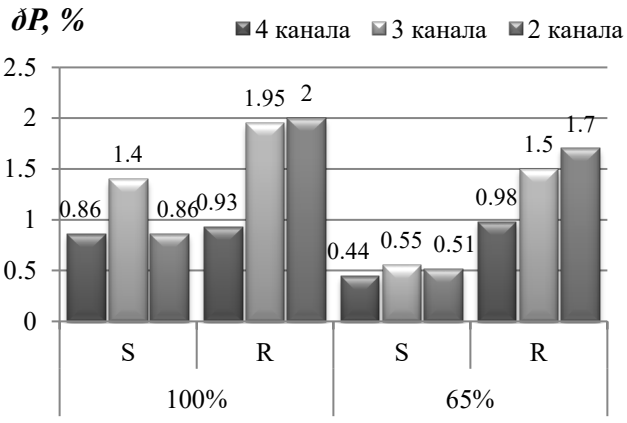


Рис.2.74. Гистограмма степеней стабильности передаваемой мощности на передающей и приемной системах при работе устройства через 30°ЛЭП

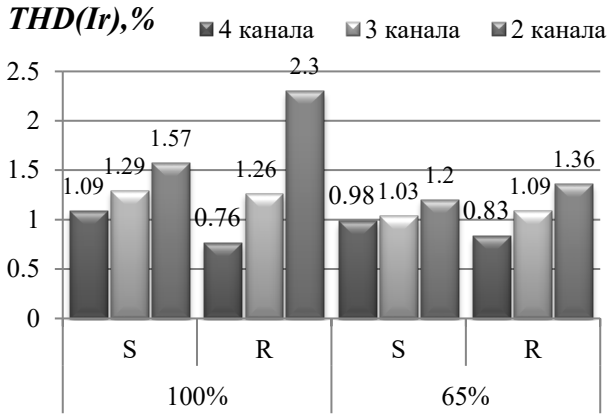


Рис.2.75. Гистограмма коэффициентов гармонических искажений тока на передающей и приемной системах при работе устройства через 30° ЛЭП

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.2.72,2.73);
- 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.2.72÷2.75). Указанные характеристики удовлетворяют требованиям стандарта по поддержанию качества электроэнергии;

- гистограммы, представленные на рис.2.72÷2.75 указывают на то, что устройство, при изменении количества работающих каналов позволяет, удерживать режимные показатели 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.2.76, а на шинах исследуемого устройства со стороны приемной и передающей системы в Приложении 10 рис.П10.33 и П10.38 соответственно.

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 происходит переходный процесс с восстановлением нормального режима.

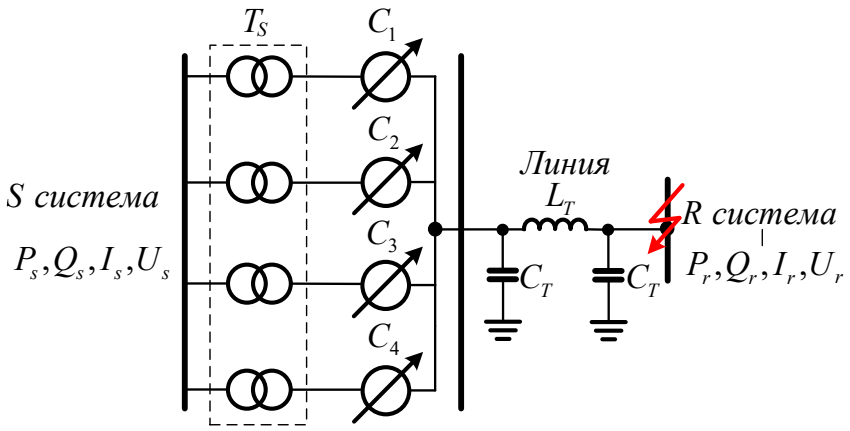


Рис.2.76. Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах приемной системы

Осциллограммы токов на передающей и приемной системах при реализации рассматриваемого сценария представлены на рис.2.77 и 2.78 соответственно. На рис.2.79 и 2.80 приведены характеристики режима передачи мощности через УМС в переходном процессе.

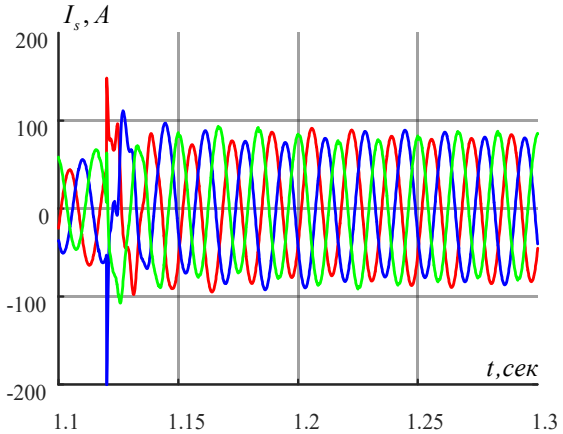


Рис.2.77. Ток на передающей системе в момент отключения короткого замыкания

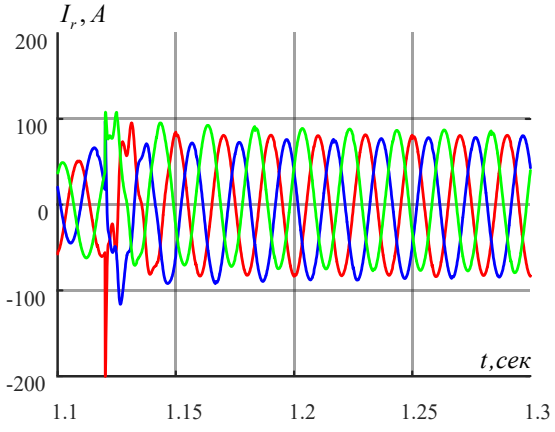


Рис.2.78. Ток на приемной системе в момент отключения короткого замыкания

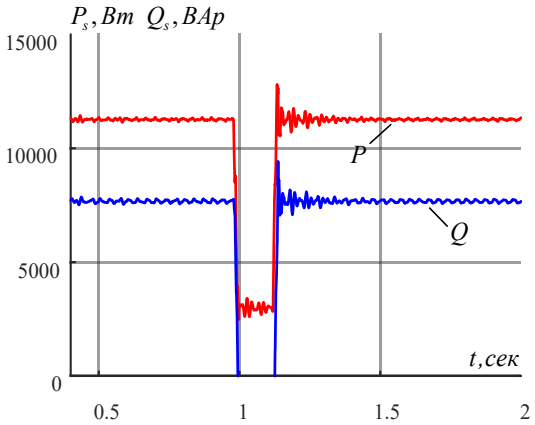


Рис.2.79. Мощности на передающей системе

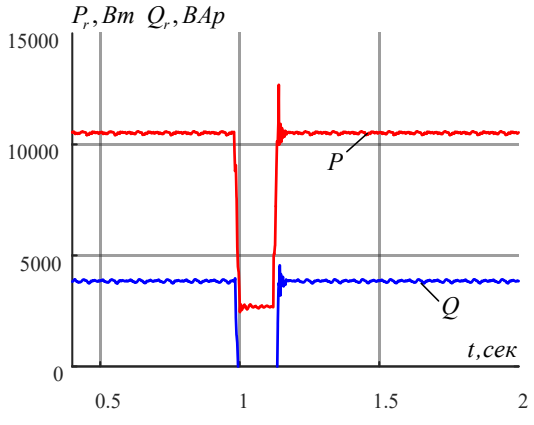


Рис.2.80. Мощности на приемной системе

Результаты вычислительных экспериментов при возникновении короткого замыкания на шинах исследуемого устройства со стороны приемной и передающей системы сведены в Приложении 10 на рис.П10.34÷П10.37 и рис.П10.39÷П10.42 соответственно.

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

- после отключения возмущения, вызванного коротким замыканием, рассматриваемое устройство восстанавливает режимные параметры до значений соответствующих нормальному режиму работы за время, не превышающее 0,2сек, которое не зависит от месторасположения точки повреждения;
- процесс восстановления режима по передаче мощности на передающей системе происходит за интервал времени, не превышающий 0,2сек, в отличие от приемной системы, где процесс восстановления происходит практически мгновенно и не зависит от удаленности устройства от места повреждения.

3. КОМБИНИРОВАННЫЕ FACTS НА ОСНОВЕ ФРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСТОЧНИКОВ НЕИЗМЕННОГО ТОКА (ТЕХНОЛОГИЯ IPC).

3.1 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 IPC [16,29,32]. 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 IPC применяется преимущественно для ограничения токов короткого замыкания, а также в целях «развязки» или подавления различного рода нежелательных бросков мощности между связанными системами при возникновении переходных процессов [29,31]. Работа устройств IPC базируется на разработанном более ста лет назад принципе, получившем свою практическую реализацию в виде схемы Карла Штейнмеца. Схема Штейнмеца позволяет с помощью сопряженных реактивных элементов обеспечить неизменность величины модуля полной ($S=\sqrt{P^2+Q^2}$) мощности, передаваемой из одной системы в другую. Данное явление сопровождается эффектом перераспределения активной и реактивной составляющих полной мощности в зависимости от значения угла δ_{sr}, что следует считать недостатком, требующим дополнительной доработки схемы в направлении дальнейшего совершенствования ее стабилизирующих возможностей.

Сущность технологии IPC, а также условия ее использования в схеме статического преобразователя частоты, могут быть представлены на примере единичного модуля преобразователя, изображенного на рисунке 3.1.

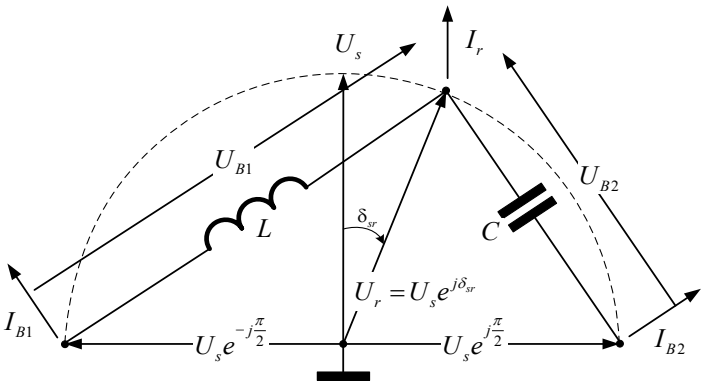


Рис.3.1. Векторная диаграмма, поясняющая работу элементарного модуля преобразователя, выполненного на основе источников неизменного тока

Указанные на рисунке элементы схемы, электрические величины и их обозначения имеют следующие значения:

- L,C – сопряженные реактивные элементы;
- $|B1|=|B2|=B$ – 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.3.1, свободные концы сопряженных реактивных элементов L,C 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:

$$I_{B1}=-jB1\cdot U_{B1},$$
$$I_{B2}=jB2\cdot U_{B2}.$$

В условиях равенства абсолютных значений проводимостей:

$$|B1|=|B2|=B.$$

Ток на выходе модуля является суммой токов сопряженных проводимостей:

$$I_r=I_{B1}+I_{B2}=jB\left(U_{B2}-U_{B1}\right),$$
$$U_{B2}-U_{B1}=\left[-e^{j\frac{\pi}{2}}+e^{-j\frac{\pi}{2}}\right]U_S=-j2U_S.$$

Тогда полная мощность на выходе модуля будет иметь следующий вид:

$$S_r=I_r\overset{*}{U}_r=I_rU_se^{-j\delta_{sr}}=2BU_sU_re^{-j\delta_{sr}}=P_r+jQ_r.$$

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

$$P_r=2BU_sU_r\cos\delta_{sr},\quad Q_r=-2BU_sU_r\sin\delta_{sr}.$$

Графики зависимости активной и реактивной мощности на выходных клеммах модуля, в зависимости от угла скольжения в режиме свободного обмена мощностью, изображенные на рис.3.2, свидетельствуют о том, что активная мощность (P_r) изменяет направление перетока

при значениях δ_{sr}, равных $\pm 90°$, а реактивная (Q_r) – при значениях δ_{sr}, соответствующих 0° и 180°.

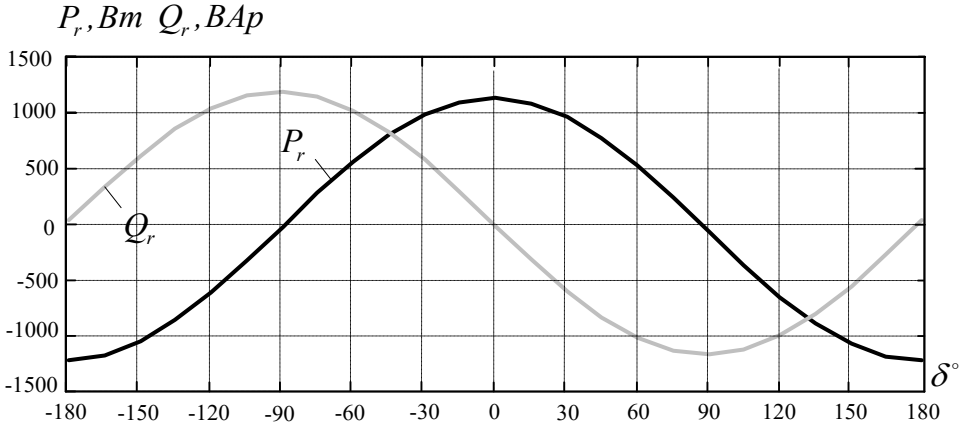


Рис.3.2. Графики зависимости активной и реактивной мощности на выходных клеммах модуля от угла скольжения в режиме свободного обмена мощностью

Упорядоченный однонаправленный поток активной мощности на выходных клеммах модуля может быть обеспечен за счет применения управляемых средств силовой электроники, как показано на рис.3.3.

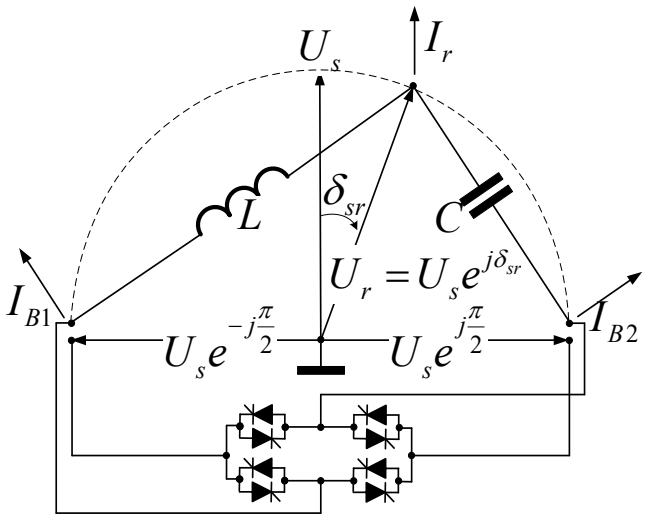


Рис.3.3. Схема, поясняющая работу элементарного модуля преобразователя при использовании средств силовой электроники

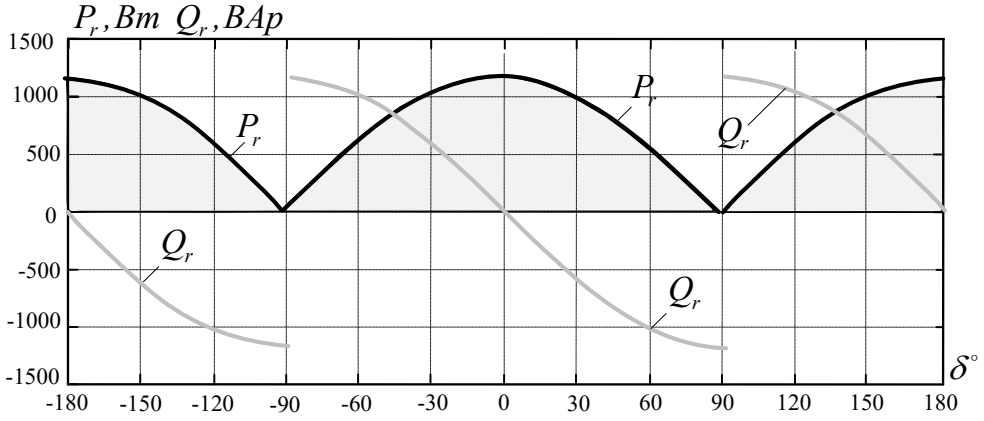


Рис.3.4. Графики зависимости активной и реактивной мощности на выходных клеммах модуля от угла скольжения при использовании средств силовой электроники

Соответствующие заданным условиям графические зависимости активной и реактивной мощности от угла δ_{sr} изображены на рис.3.4. При этом важно отметить, что затемненные «полуволны» активной мощности P_r характеризуют не процесс выпрямления, а процесс реверсирования активной и реактивной мощности переменного тока.

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 скачки. Применение многомодульной схемы может снизить броски сопровождающей реактивной мощности в момент коммутации. В рамках выполненного исследования 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.3.5.

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

$$A_n^k = n^k, \tag{3.1}$$

где

k – количество сопряженных реактивных элементов;

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

Для схемного варианта преобразователя частоты, представленного на рис.3.5, оснащенного шестью парами сопряженных реактивных элементов, согласно выражению 3.1, получены 4096 неповторяющихся комбинаций включения ключей. При этом каждая пара сопряженных реактивных элементов обеспечивает амплитудное значение передаваемой активной (P) и реактивной (Q) мощности, изменяющейся по косинусоидальному закону с начальной фазой.

Начальные фазы активной (P) и реактивной (Q) составляющих при 4 неповторяющихся комбинациях включения ключей на каждой паре сопряженных реактивных элементах представлены в таблицах 3.1 и 3.2 соответственно.

Таблица 3.1 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°	180°	$P = 0$	$P = 0$
2	III, IV	150°	330°	$P = 0$	$P = 0$
3	V, VI	300°	120°	$P = 0$	$P = 0$
4	$VII, VIII$	90°	270°	$P = 0$	$P = 0$
5	IX, X	240°	60°	$P = 0$	$P = 0$
6	XI, XII	30°	210°	$P = 0$	$P = 0$

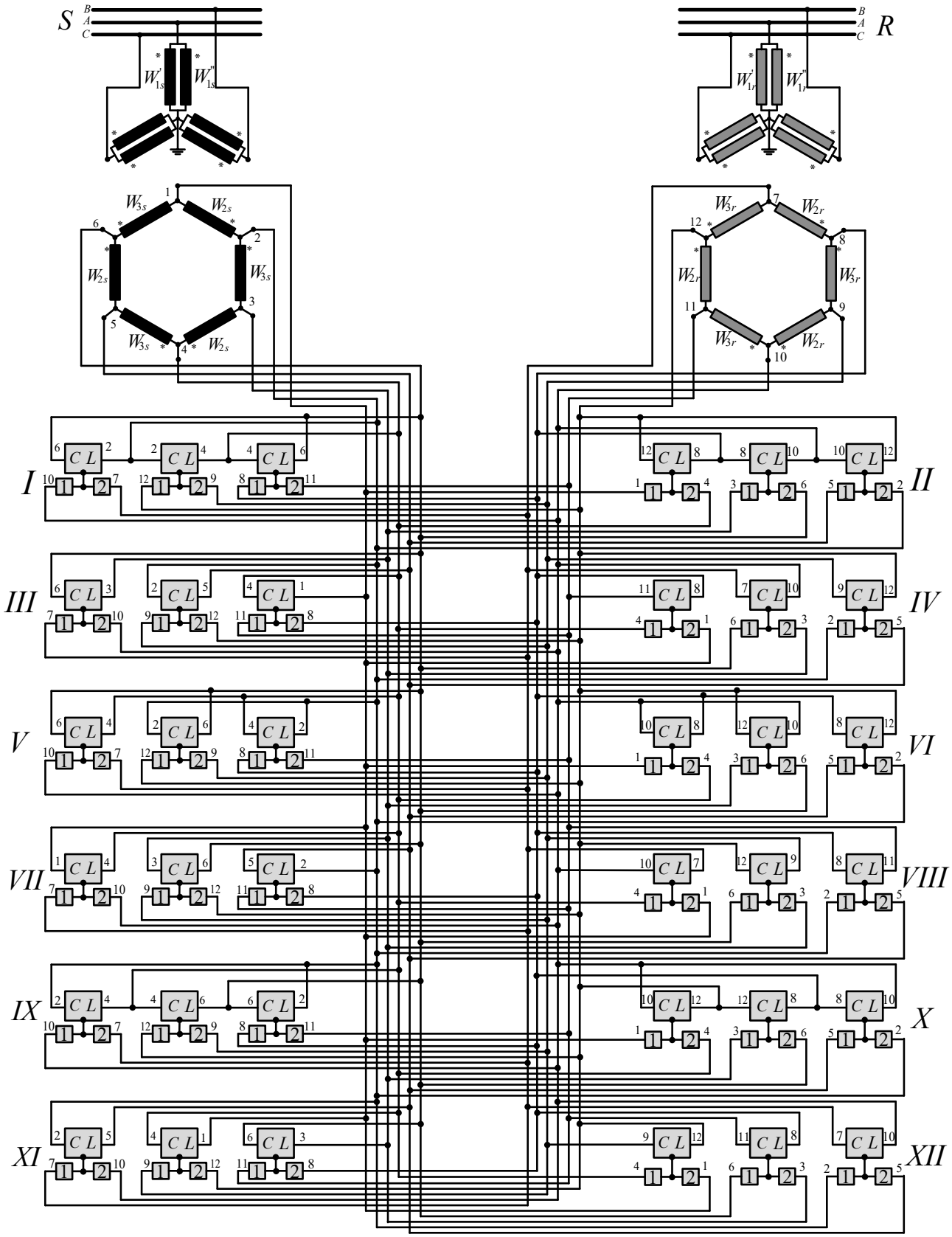


Рис.3.5. Электрическая схема статического преобразователя частоты выполненного на основе источников неизменного тока

Величину и направление передаваемой активной и реактивной мощности через устройство 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 [144]:

$$P_m = P_n^{I,II} + P_n^{III,IV} + P_n^{V,VI} + P_n^{VII,VIII} + P_n^{IX,X} + P_n^{XI,XII} + P_0\,, \tag{3.2}$$

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.

$$Q_m = Q_n^{I,II} + Q_n^{III,IV} + Q_n^{V,VI} + Q_n^{VII,VIII} + Q_n^{IX,X} + Q_n^{XI,XII} + Q_0\,, \tag{3.3}$$

где:
m – номер комбинации включения ключей на парных модулях устройства, от 1 до 4096;
$Q_n^{I,II}, Q_n^{III,IV}, Q_n^{V,VI}, Q_n^{VII,VIII}, Q_n^{IX,X}, Q_n^{XI,XII}$ – 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.

Таблица 3.2 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°	270°	$Q=0$	$Q=0$
2	III,IV	240°	60°	$Q=0$	$Q=0$
3	V,VI	30°	210°	$Q=0$	$Q=0$
4	$VII,VIII$	180°	0°	$Q=0$	$Q=0$
5	IX,X	330°	150°	$Q=0$	$Q=0$
6	XI,XII	120°	300°	$Q=0$	$Q=0$

В соответствии с таблицей 3.1, 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:

$$P_n^{I,II} = P \cdot cos(\delta_{sr} - 0) = P \cdot cos\,\delta_{sr}, при\, n = 1-1\,. \tag{3.4}$$

Выражения, позволяющие определить величину и направление передаваемой активной и реактивной мощности, для всех последующих пар приведены в таблицах 3.3 и 3.4 соответственно.

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.3.6.

Таблица 3.3 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	$P\cdot(-\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos\delta_{sr}+\frac{1}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	$P\cdot(\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos\delta_{sr}-\frac{1}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	0	0
3	V,VI	$P\cdot(\frac{1}{2}\cdot\cos\delta_{sr}-\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	$P\cdot(-\frac{1}{2}\cdot\cos\delta_{sr}+\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	0	0
4	$VII,VIII$	$P\cdot\sin\delta_{sr}$	$-P\cdot\sin\delta_{sr}$	0	0
5	IX,X	$P\cdot(-\frac{1}{2}\cdot\cos\delta_{sr}-\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	$P\cdot(\frac{1}{2}\cdot\cos\delta_{sr}+\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	0	0
6	XI,XII	$P\cdot(\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos\delta_{sr}+\frac{1}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	$P\cdot(-\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos\delta_{sr}-\frac{1}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	0	0

Таблица 3.4 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,II	$Q\cdot\sin\delta_{sr}$	$-Q\cdot\sin\delta_{sr}$	0	0
2	III,IV	$Q\cdot(-\frac{1}{2}\cdot\cos\delta_{sr}-\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	$Q\cdot(\frac{1}{2}\cdot\cos\delta_{sr}+\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	0	0
3	V,VI	$Q\cdot(\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos\delta_{sr}+\frac{1}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	$Q\cdot(-\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos\delta_{sr}-\frac{1}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	0	0
4	$VII,VIII$	$-Q\cdot\cos\delta_{sr}$	$Q\cdot\cos\delta_{sr}$	0	0
5	IX,X	$Q\cdot(\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos\delta_{sr}-\frac{1}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	$Q\cdot(-\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\cos\delta_{sr}+\frac{1}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	0	0
6	XI,XII	$Q\cdot(-\frac{1}{2}\cdot\cos\delta_{sr}+\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	$Q\cdot(\frac{1}{2}\cdot\cos\delta_{sr}-\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\sin\delta_{sr})$	0	0

Рис.3.6 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).

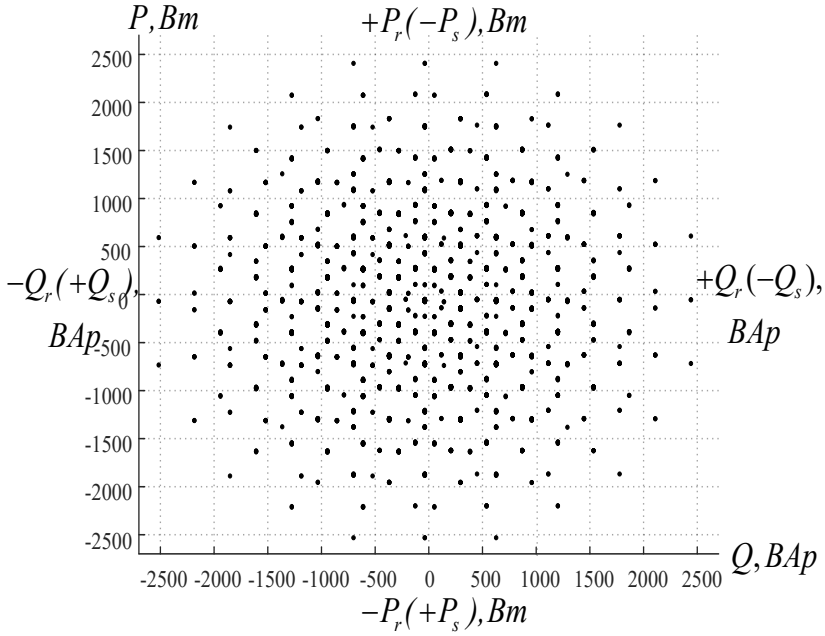


Рис.3.6. Комплексная плоскость значений передаваемых мощностей на входе и выходе устройства

Анализ полученных данных позволил выявить набор из 71 уникального варианта стабильной передачи активной и реактивной мощности по заданной диаграмме переключения ключей при согласовании частоты. На рис.3.7 представлен вариант режима с максимальным уровнем передачи активной мощности при работе УМС двух энергосистем с разными стандартами по поддержанию частоты.

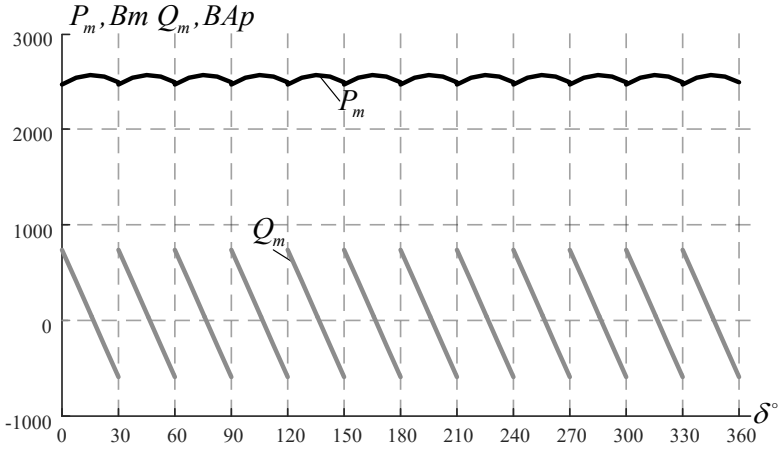


Рис.3.7. Сумма расчетных значений активных и реактивных мощностей модулей при статическом состоянии устройства

Предложенный вариант преобразовательного устройства может быть применен в качестве «частотной развязки» между системами, содержащими значительную долю ВИЭ, а также работать в качестве УМС.

3.2 Статический преобразователь частоты на основе источников неизменного тока.

Разработка схемы преобразователя частоты на основе источников неизменного тока

Для верификации, описанной в пункте 3.1 математической модели и принципиальной схемы рис.3.5, разработана структурно–имитационная модель преобразовательного устройства [74].

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 (IPC), 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.3.8.

Модуль		I,II		III,IV		V,VI		VII,VIII		IX,X		XI,XII	
Диапазон δ°		$-90^\circ \div 90^\circ$	$90^\circ \div 270^\circ$	$-60^\circ \div 120^\circ$	$120^\circ \div 300^\circ$	$-30^\circ \div 150^\circ$	$150^\circ \div 330^\circ$	$0^\circ \div 180^\circ$	$-180^\circ \div 0^\circ$	$30^\circ \div 210^\circ$	$-150^\circ \div 30^\circ$	$60^\circ \div 240^\circ$	$-120^\circ \div 60^\circ$
Ключи	1	●			●	●			●	●			●
	2		●	●			●	●			●	●	

Рис. 3.8. Диаграмма переключения элементарных модулей преобразователя

Необходимо отметить, что параметры элементарных модулей преобразователя не одинаковы по величине. Как следует из принципиальной схемы рис.3.5, 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.3.9.

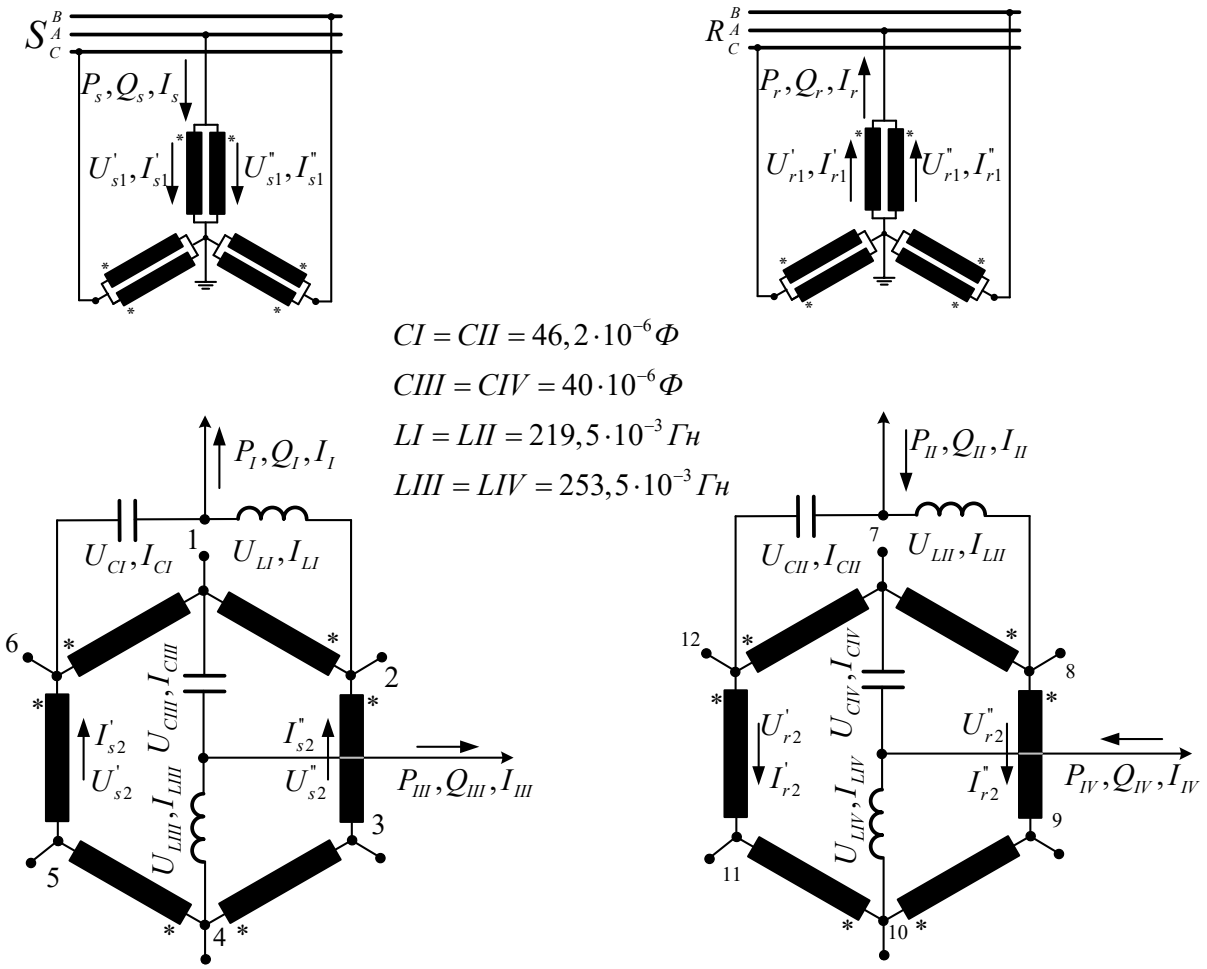


Рис.3.9. Собственные параметры модулей и обозначения измеряемых электрических величин имитационной модели преобразователя частоты

Имитационная модель преобразователя частоты выполнена на номинальное напряжение 230В и ток 12А, и оснащена необходимой системой измерения для проведения вычислительных экспериментов, воспроизводящих статические и динамические поведение устройства.

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 8.

В качестве примера на рис.3.10 приведены характеристики изменения активных и реактивных мощностей на вводах и выводах преобразовательного устройства, представленные в зависимости от угла δ_{sr} при статическом состоянии преобразователя.

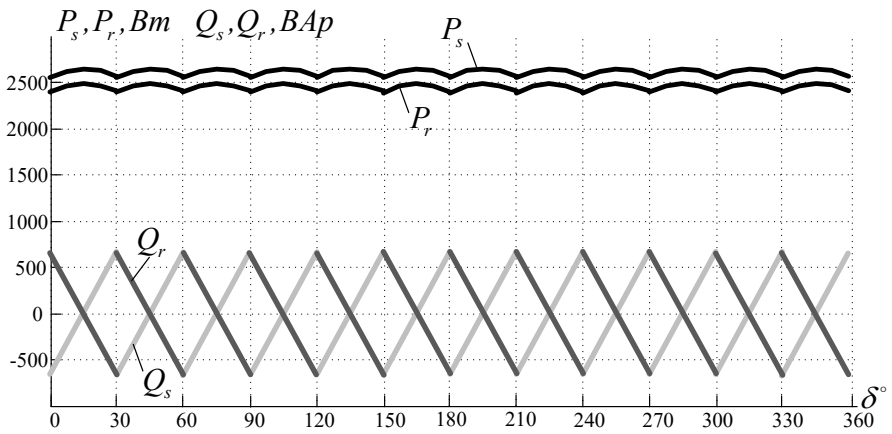


Рис.3.10. Экспериментальные значения активной и реактивной мощности на вводах и выводах устройства.

Анализируя графики рис.3.10 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 работой средств силовой электроники в соответствии с заданной диаграммой переключения. Разница между активной мощностью на входе P_s и выходе P_r устройства обусловлена наличием потерь мощности в трансформаторах. Также обращает на себя внимание характер передачи реактивной мощности со стороны передающей Q_s и принимающей Q_r систем, 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 8 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 3.1 и в процессе структурно-имитационного моделирования показал, что [144]:

- как метод математического, так и метод структурно-имитационного моделирования дают близкие результаты, о чем свидетельствует анализ характеристик, рис. 3.10, рис. 3.7;
- 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.

Исследование характеристик устройства при асимметричном управлении

Детальный анализ графика представленного на рис.3.10 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 [73,74].

Принципиальная электрическая схема устройства, обеспечивающего улучшенные характеристики качества преобразования, представлена на рис 3.11.

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 «шестиугольник», а на приемной стороне, соединены по схеме «шестиугольник» с ответвлениями на его вершинах. Количество витков ответвлений 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 управлении устройством.

Так же отличительной особенностью предложенной схемы преобразователя является то, что каждый канал формируется набором трехфазных блоков элементарных (*CL*) модулей, которые представлены на рис.3.11. 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.

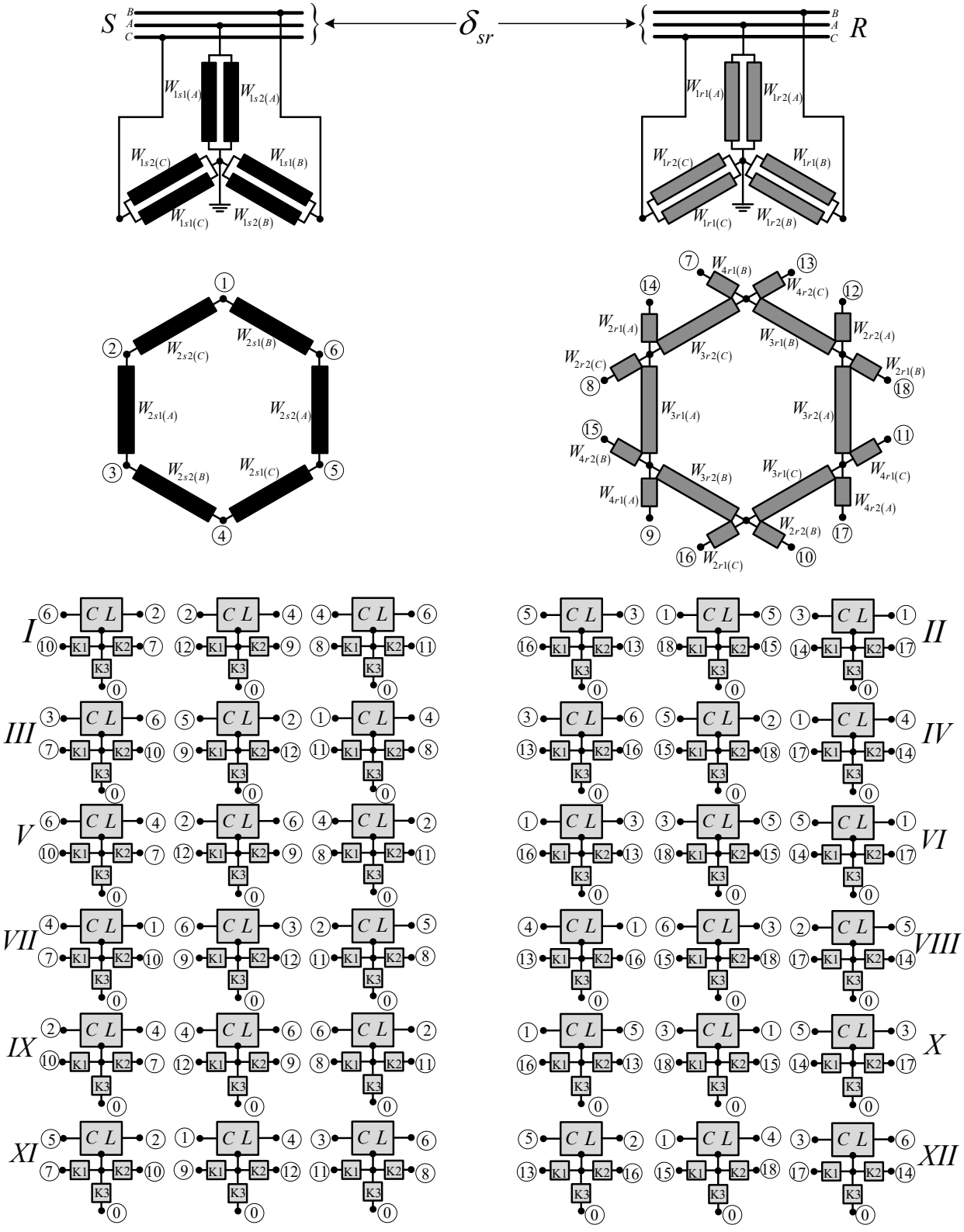


Рис.3.11. Электрическая схема предложенного технического решения

Каждый элементарный модуль оснащен собственной системой управления в виде силовых ключей, представленных на схеме рис.3.11 в виде квадратных элементов K1÷K3. 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 IPC, 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.3.12. Как видно из схемы свободные концы сопряженных реактивных *CL*–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.

К средней точке сопряженных реактивных элементов подключены силовые ключи (K1 и K2) 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 K1 и K2 обеспечивает возможность передачи мощности одним элементарным модулем в заданном направлении.

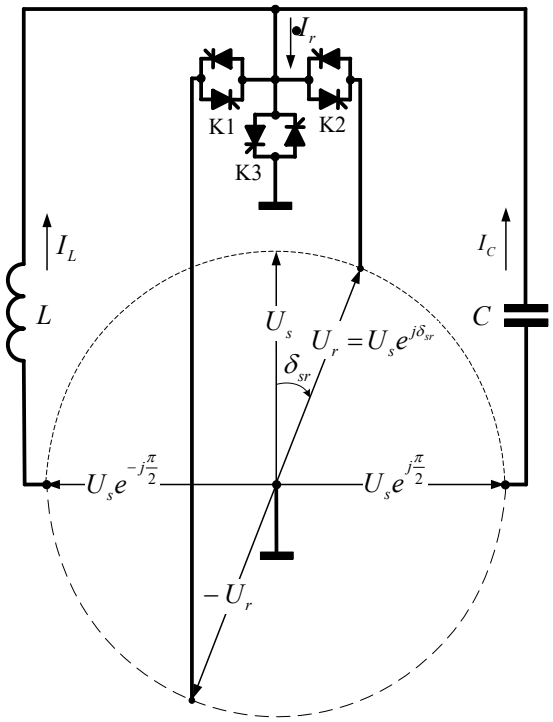


Рис.3.12. Схема, поясняющая работу элементарного модуля

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 3.1. Характер изменения активной и реактивной мощности в зависимости от угла δ_{sr} иллюстрируется графиками, показанными на рис.3.13.

При рассмотрении данных графиков видно, что срабатывание 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.

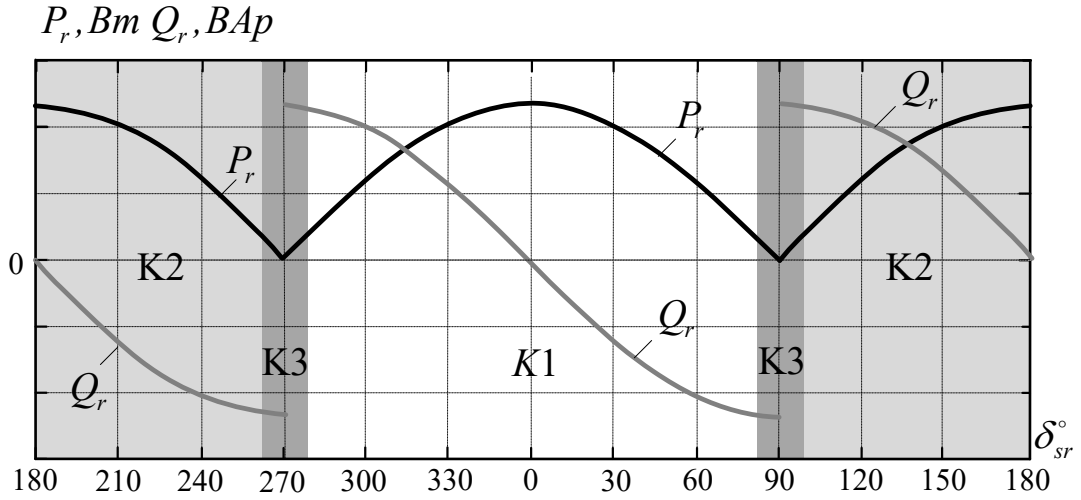


Рис.3.13. Изменение активной и реактивной мощности одного модуля

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 переключением силовых ключей.

Расчетные эксперименты, проведенные с помощью структурно–имитационной модели, в соответствии с приведенной диаграммой переключений, указанной в Приложении 8 рис.П8.17, позволили получить характеристики изменения активных и реактивных мощностей на вводах и выводах устройства в зависимости от угла δ_{sr} устройства в целом, рис. 3.14, а также полную картину, иллюстрирующую работу отдельных элементов преобразователя в статическом состоянии рис.3.15.

Графики, приведенные на рис.3.14, показывают периодическое повторение формы кривых мощности, определяющих качество процесса обмена энергией между электрическими системами. В этом случае полный диапазон (0°÷360°) 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) мощностей соответствуют моментам срабатывания 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. Разница между активной мощностью P_s и P_r, обусловлена потерями активной мощности в устройстве.

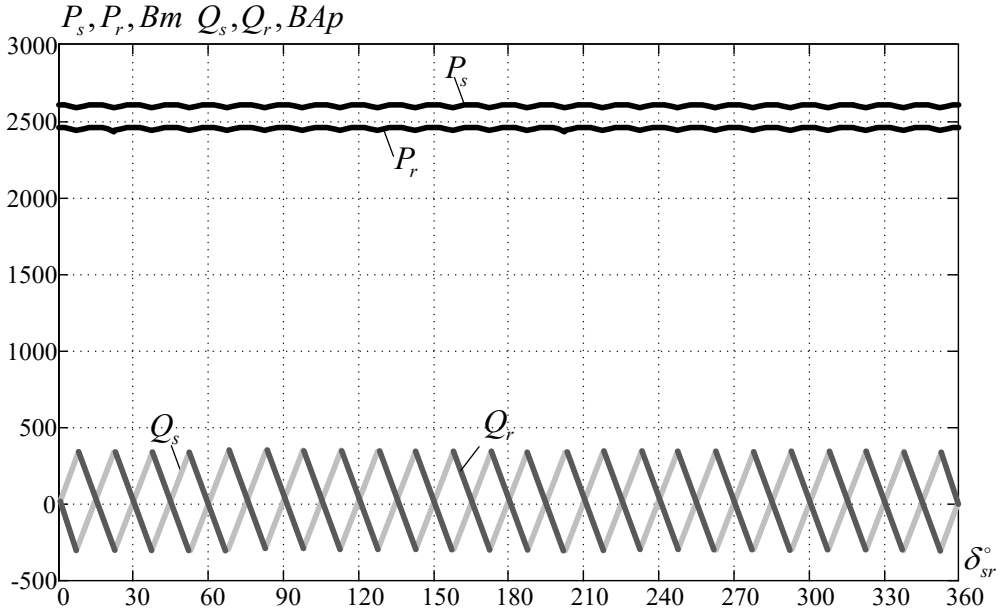


Рис. 3.14. Статические характеристики мощности преобразователя

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. Это свойство контроллера сохраняется 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 работы устройства в 6,5 раз, а именно до 2403 комбинации из 4096 возможных, приведенных на *PQ* диаграммах рис.3.16.

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 ±100% от установленной мощности устройства, позволяющие обеспечить УМС переменного тока.

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.3.12.

Ввод ключа К3 в схему устройства влечет за собой существенное увеличение уровней передачи мощности устройством. Результатом введения в схему ключа К3 стало получение 531441 неповторяющейся комбинации включения ключей. Область оригинальных значений передаваемых мощностей устройством представлена на рис.3.17 и составляет 341097 уровней, поскольку 190344 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.

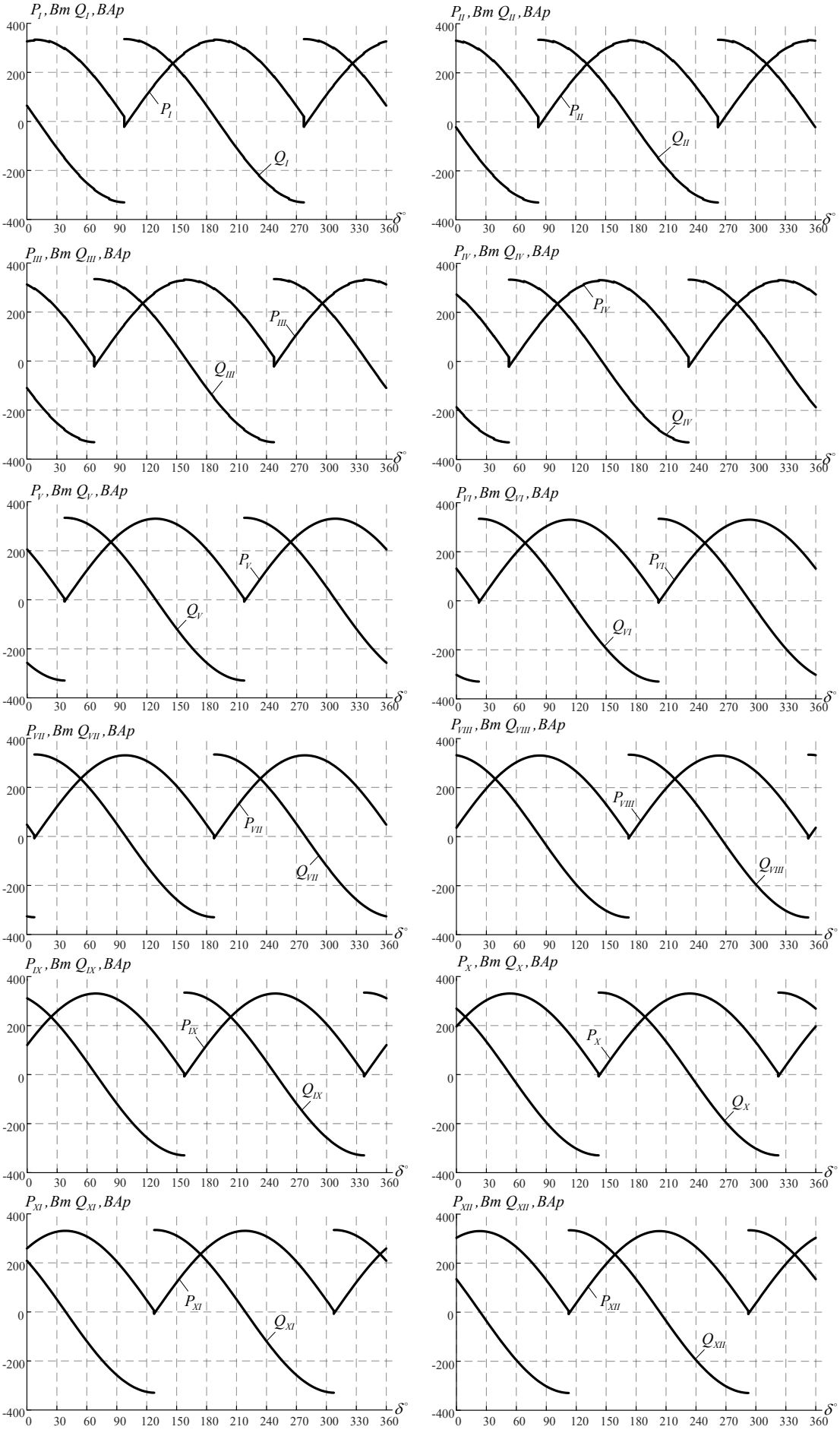
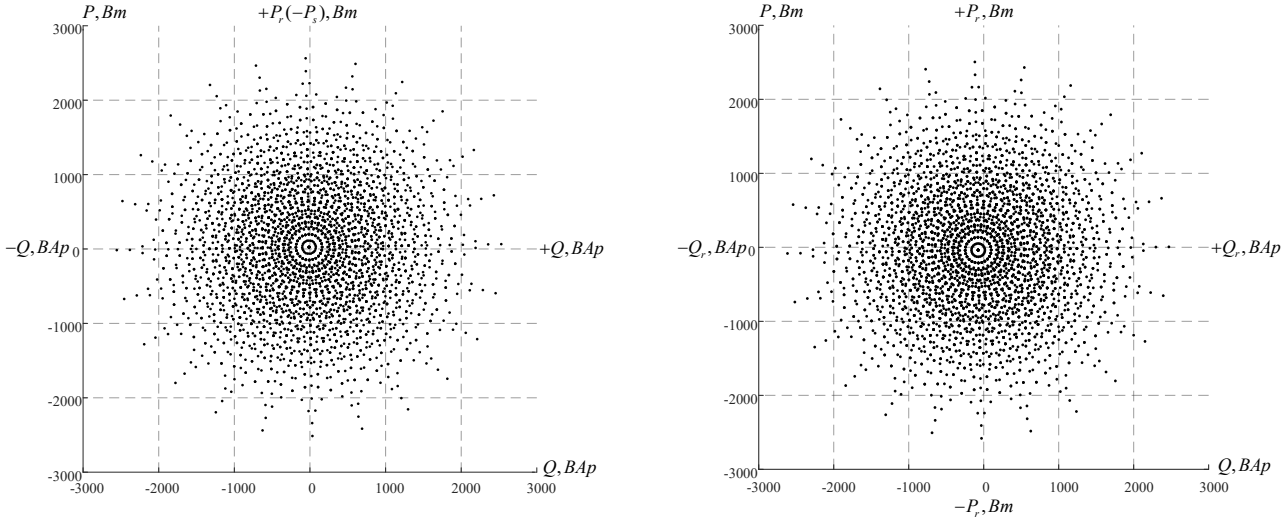

$P_I, Вт\ Q_I, ВАр$
P_I
Q_I
$P_{II}, Вт\ Q_{II}, ВАр$
P_{II}
Q_{II}
$P_{III}, Вт\ Q_{III}, ВАр$
P_{III}
Q_{III}
$P_{IV}, Вт\ Q_{IV}, ВАр$
P_{IV}
Q_{IV}
$P_V, Вт\ Q_V, ВАр$
P_V
Q_V
$P_{VI}, Вт\ Q_{VI}, ВАр$
P_{VI}
Q_{VI}
$P_{VII}, Вт\ Q_{VII}, ВАр$
P_{VII}
Q_{VII}
$P_{VIII}, Вт\ Q_{VIII}, ВАр$
P_{VIII}
Q_{VIII}
$P_{IX}, Вт\ Q_{IX}, ВАр$
P_{IX}
Q_{IX}
$P_X, Вт\ Q_X, ВАр$
P_X
Q_X
$P_{XI}, Вт\ Q_{XI}, ВАр$
P_{XI}
Q_{XI}
$P_{XII}, Вт\ Q_{XII}, ВАр$
P_{XII}
Q_{XII}
400
200
0
-200
-400
0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360
δ°

Рис.3.15. Статические характеристики каждого элементарного модуля



а) на модулях б) на приемной системе

Рис.3.16. Область возможных значений передаваемых мощностей.

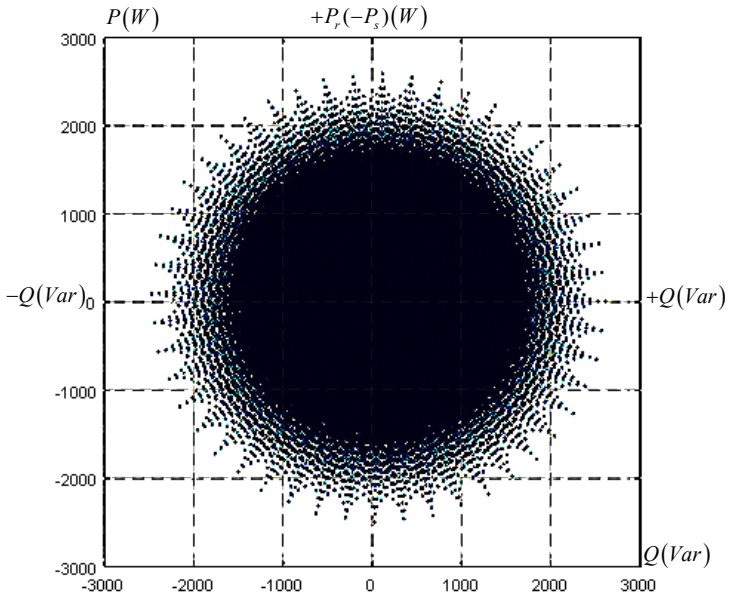


Рис. 3.17. Область возможных значений передаваемых мощностей при использовании ключа К3

Как видно из рис.3.17, 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 регулирование режима УМС, созданной на ее основе

Анализ возможности улучшения качества преобразований на основе модернизированного варианта схемы устройства

Анализ предлагаемого варианта схемы устройства выполнялся при организации УМС двух энергосистем с разными стандартами по поддержанию частоты [74].

В качестве примера рассмотрена ситуация, в которой передающая система работает с частотой 60Гц, а принимающая – 59,8Гц. 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 моментов времени срабатывания для каждого ключа при реализации операций переключений на модели.

Ранее при рассмотрении графиков, представленных на рис.3.15, 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.3.13. Такое действие может позволить уменьшить уровень бросков реактивной мощности при операциях переключений, а так же оказать положительное влияние на качество процесса преобразования.

Для определения оптимального времени нахождения ключа К3 в включенном состоянии были исследованы три режима работы преобразователя при различном времени включения ключа К3. Осциллограммы, полученные в процессе структурно–имитационного моделирования процесса преобразования для трех значений времени включении ключа К3 приведены на рис.3.18÷3.20.

Первым режимом работы является режим преобразования, который контролируется прямым обменом энергии между ключами К1 и К2 без кратковременного включения ключа К3 (рис.3.18). Этот режим характеризуется довольно высоким показателем коэффициента гармонических искажений токов на шинах 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».

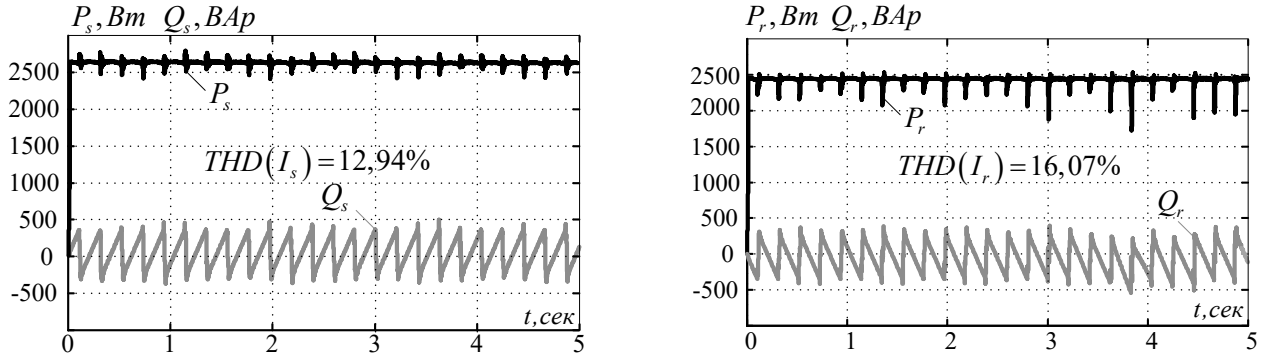


Рис.3.18. Режим преобразования управляется прямым обменом энергией между ключами К1 и К2 без кратковременного включения ключа К3

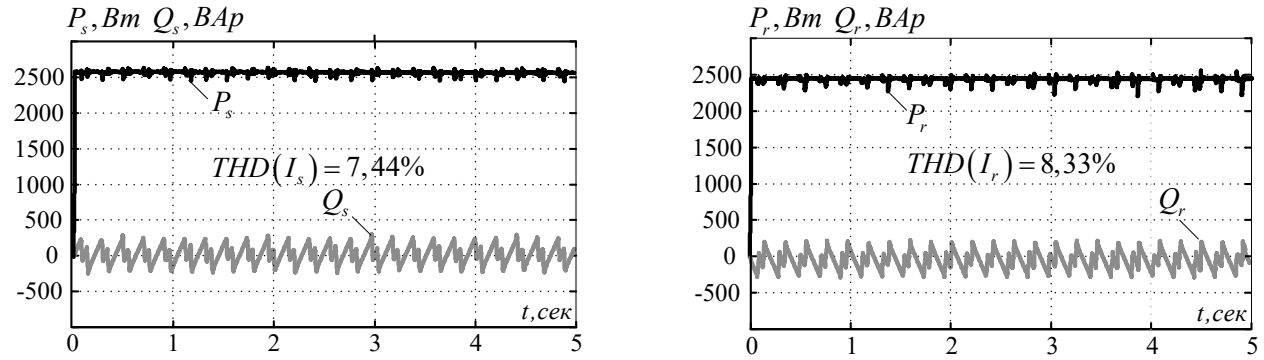


Рис.3.19. Режим преобразования с кратковременным включением ключа К3 длительностью $\tau = 0,055556$ секунд

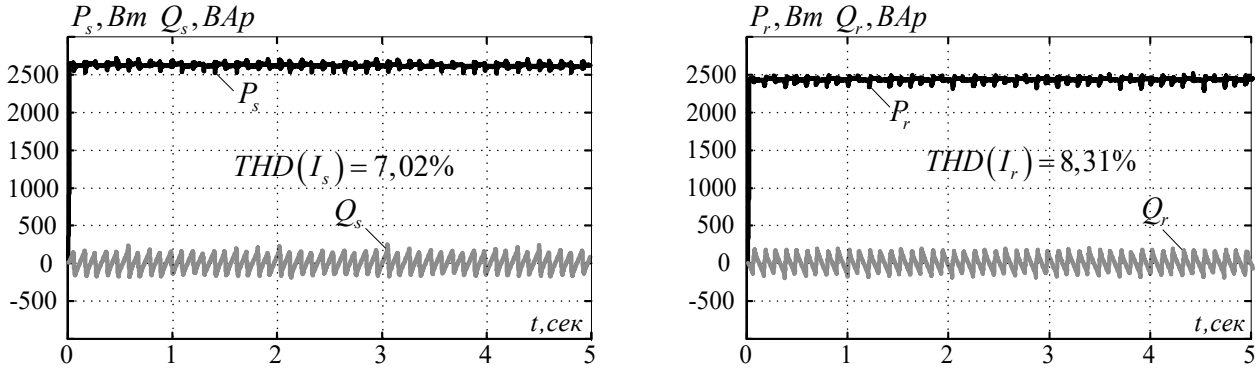


Рис.3.20. Режим преобразования с кратковременным включением ключа КЗ длительностью $\tau = 0,111111$ секунд

Вторым режимом работы является режим преобразования с кратковременным включением ключа КЗ длительностью $\tau = 0,055556сек$ (рис.3.19). Длительность кратковременного включения ключа КЗ при заданном скольжении $0,2Гц$ соответствует $\tau = 0,055556сек$ или изменению угла δ_{sr} на 4°. В этом случае силовой ключ КЗ 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 *LC*–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 искажения 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 $\tau = 0,111111сек$ (рис.3.20).

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

По результатам анализа первого этапа (без применения фильтро-компенсирующих устройств) можно сделать вывод о том, что третий режим можно рассматривать как наилучший с точки зрения качества преобразования.

В соответствии с Международным стандартом IEEE-519 [60] допустимое значение коэффициента гармонического искажения 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 $THD \le 8\%$. На рис.3.21,3.22 представлены гистограммы, иллюстрирующие характеристики преобразования при различном времени нахождения ключа КЗ во включенном состоянии.

Как следует из проведенного анализа третьего режима ($\tau = 0,111111сек$), коэффициент гармонических искажений на передающей и приемной системах характеризуется величинами $THD(I_s) = 7,02\%$ и $THD(I_r) = 8,31\%$ соответственно. Этот результат довольно близок к требованиям стандарта IEEE-519 [60]. Таким образом дальнейшее улучшение качества преобразования при использовании статического преобразователя на основе источников

неизменного тока может быть осуществлено посредством применения гармонических фильтров и демпферов.

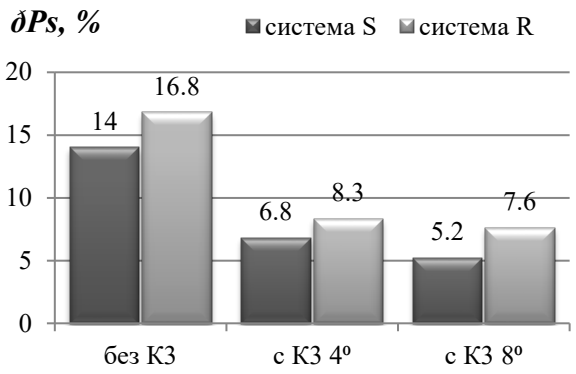


Рис.3.21. Гистограмма степеней стабильности передаваемой мощности на передающей и приемной системах при работе устройства на активную нагрузку

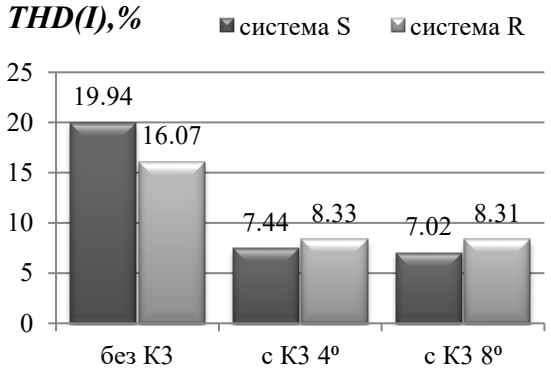
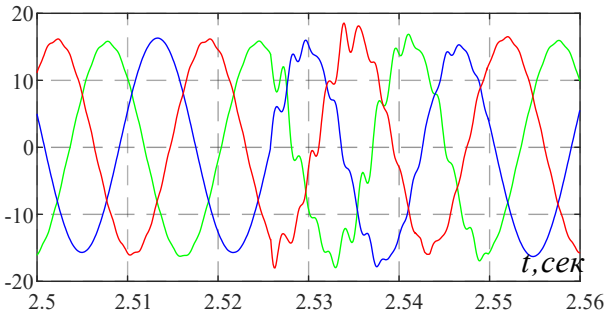


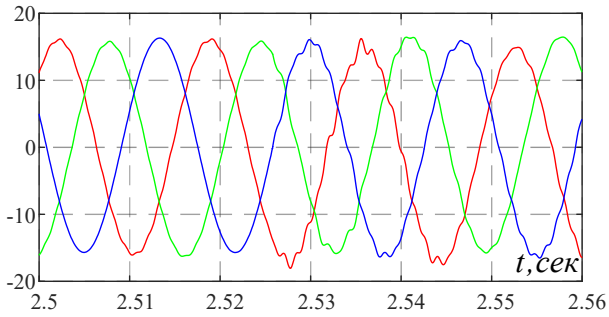
Рис.3.22. Гистограмма коэффициентов гармонических искажений тока на передающей и приемной системах при работе устройства на активную нагрузку

Вторым этапом исследования с целью улучшения качества преобразования было применение гармонических фильтров. Были использованы фильтры с различными параметрами подключаемые к вершинам «многоугольника» передающей системы на землю (точки 1–6, рис.3.11). Осциллограммы токов на передающей и приемной системе, иллюстрирующие эффект применения последовательных LC фильтров ($L = 47 \cdot 10^{-3}\,H$, $C = 6 \cdot 10^{-6}\,F$) при работе устройства приведены на рис.3.23. Анализ осциллограмм рис.3.23 показывает, что применение фильтров, подключенных к вершинам многоугольника передающей системы, существенно улучшает форму кривых тока.

Ток передающей системы

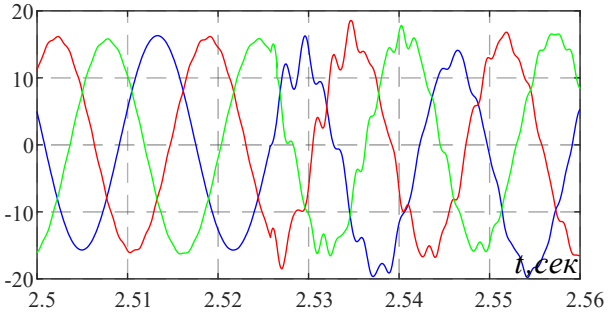


без фильтров, $THD(I_s) = 7{,}02\%$

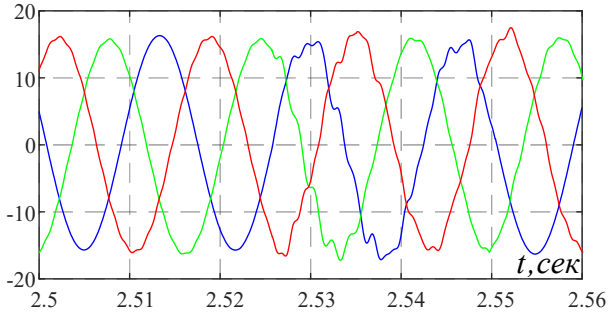


с применением фильтров, $THD(I_s) = 4\%$

Ток приемной системы



без фильтров, $THD(I_r) = 8{,}31\%$



с применением фильтров, $THD(I_r) = 5{,}07\%$

Рис. 3.23. Осциллограммы токов на передающей и приемной системах, до и после применения фильтров

Таким образом, коэффициент гармонических искажений тока, при кратковременном включении ключа К3 длительностью $\tau = 0,111111сек$ и включением соответствующих фильтров, удается 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 $THD(I_r) = 5,07\%$, что удовлетворяет требованиям стандарта IEEE-519 [60].

3.3 Источник реактивной мощности, управляемый ФРТ

Одним из важных компонентов развития технологии «Smart Grid» применительно к электроэнергетике является использование FACTS–контроллеров, быстродействие, которых обеспечивается применением средств силовой электроники. Особенно это становится актуальным при возрастающем объеме использования распределенной генерации, а также возобновляемых источников энергии.

В связи с этим, получают широкое распространение различные устройства регулирования реактивной мощности, позволяющие обеспечить комплексное управление параметрами режима [107,29,104,41,118,22,111].

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

В связи с тем, что компенсация реактивной мощности обеспечивает достаточно высокую экономическую и энергетическую эффективность, в промышленно развитых странах решению этого вопроса уделяют особое внимание [92,17,117,48].

В работе было исследовано устройство для компенсации реактивной мощности, построенное на базе парных реактивных элементов, регулируемых фазоповоротным трансформатором (ФРТ) с применением средств силовой электроники [132].

Для управления предложенным схемным вариантом ИРМ был использован ФРТ, выполненный в «гексагональной» конфигурации. Принципиальная схема (рис.1.47) и результаты исследования, возможностей снижения установленной мощности ФРТ, используемого для управления ИРМ, были представлены ранее в главе 1.

Предлагаемое устройство состоит из следующих элементов:

- трансформатора, с первичными обмотками, соединенными попарно в звезду и включенными в рассечку линии, а также вторичными обмотками, соединенными по схеме шестиугольника;
- фазорегулирующего трансформатора, включенного пофазно к вершинам шестиугольника и возможностью реверсирования;
- сопряженных реактивных проводимостей L и C присоединенных к устройству, по схеме, представленной на рис.3.24.

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

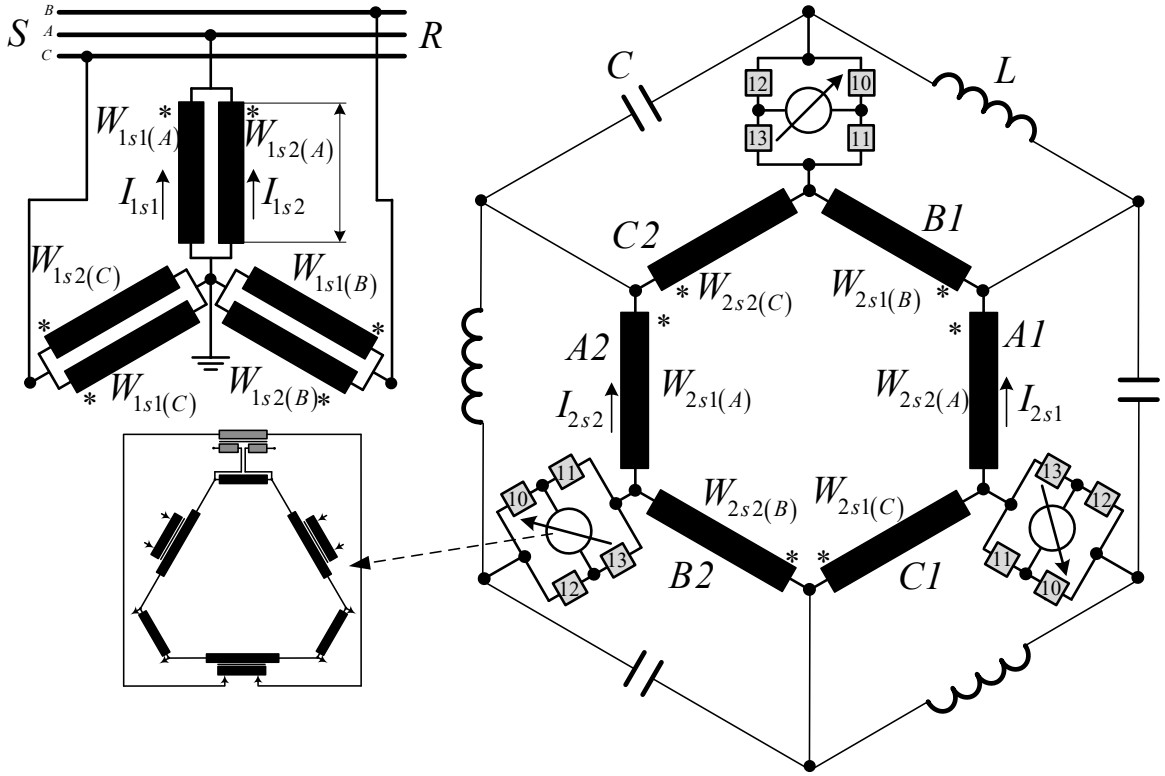


Рис.3.24. Схема управляемого источника реактивной мощности

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

Полный ток на выходе устройства, кривая изменения которого в процессе регулирования приведена на рис.3.25;

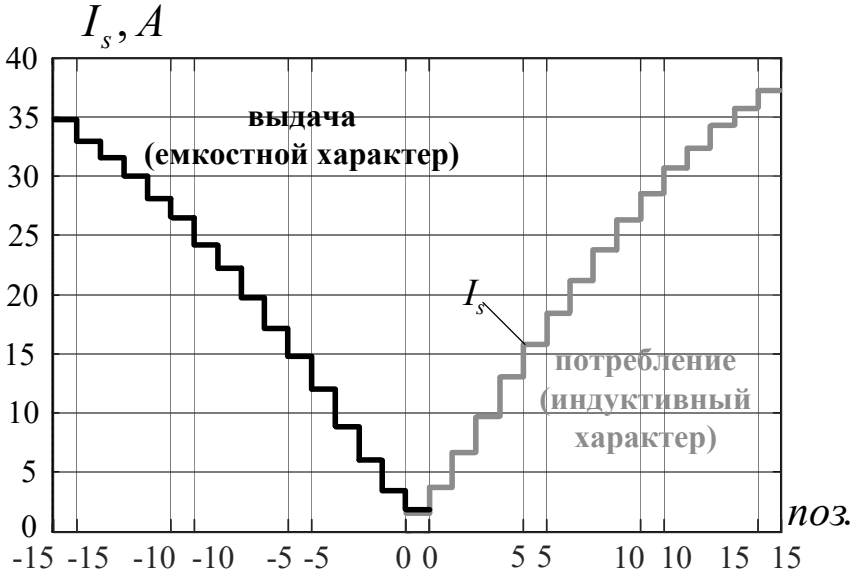


Рис.3.25.График изменения выходного тока устройства

Потери активной мощности, характер изменения величины которых, имеет сложную форму и представлен на рис.3.26;

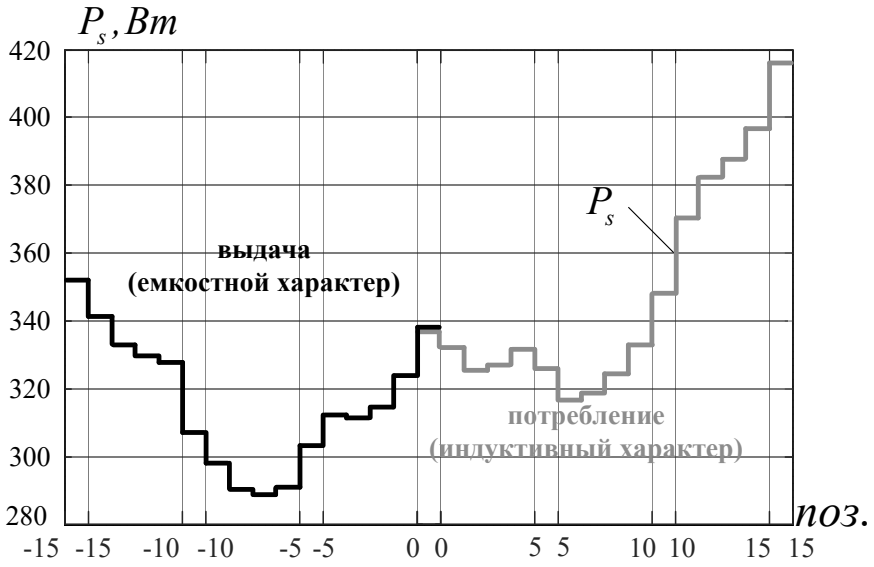


Рис.3.26.График изменения величины активных потерь

Как видно из рис.3.26, максимальная величина потерь активной мощности имеет место в режиме потребления реактивной мощности и составляет примерно 5% от установленной мощности устройства.

Реактивная мощность в режимах выдачи и потребления отображена на рис.3.27.

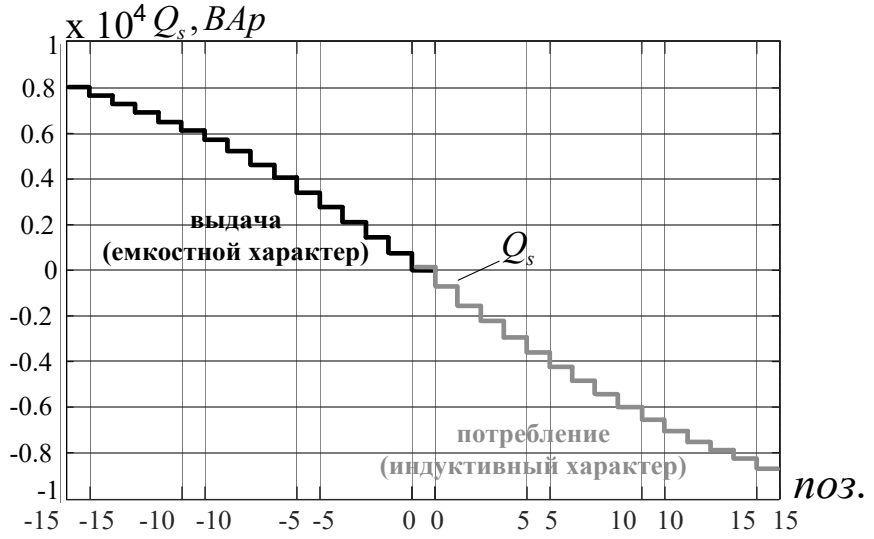


Рис.3.27. График выдачи и потребления реактивной мощности

Анализ представленной на рис.3.27 зависимости позволил сделать заключение о том, что предлагаемое устройство дает возможность осуществлять практически симметричное регулирование реактивной мощности как потребляемой, так и выдаваемой в сеть.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

В работе рассмотрена специфика построения фазорегулирующих устройств трансформаторного типа, проанализированы различные способы получения вольтодобавочного напряжения для регулирования угла фазового сдвига. Показана связь между способами создания вольтодобавочного напряжения и допустимыми диапазонами регулирования по углу. Определены критерии, влияющие на выбор схемного варианта и компоновки ФРТ.

Предложены системы секционирования обмоток управления ФРТ, позволившие обеспечить различное количество позиций регулирования угла фазового сдвига. Разработаны и апробированы законы переключения силовыми ключами, реализующие требуемую стратегию управления. Показано, что различные варианты регулирования дают одинаковые результаты по всем основным режимным и энергетическим характеристикам. Показано, что применение быстродействующего управления, обеспечиваемого силовыми ключами, дает ряд преимуществ, позволяющих использовать устройство в качестве активного элемента современных Smart Grid систем.

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

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

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

Доказана возможность реализации принципа кругового вращения фазы выходного напряжения относительно входного на основе трансформаторных устройств. Разработаны и исследованы оригинальные схемные варианты FACTS контроллеров управляемые ФРТ. На основе схем «треугольник», «зигзаг» и «шестиугольник» были предложены и исследованы частотные преобразователи, в различных модификациях и характерных режимах работы. Проиллюстрирована возможность качественного преобразования частоты и передачи активной мощности между энергосистемами с различными стандартами по поддержанию частоты. Предложены мероприятия по улучшению качества передачи мощности в процессе частотного преобразования (уменьшение дискретности регулирования, использование дополнительных демпферных элементов, корректировка стратегии управления (безреверсный вариант)) и доказана их эффективность.

Показана эффективность принципа многоканальности на статических трансформаторных преобразователях, что может позволить обеспечить резервирование каналов устройства, проведение текущих и капитальных ремонтов каждого отдельного канала без нарушения работы УМС, что может оказать положительный эффект в части повышения надежности.

Разработаны математические модели преобразовательных устройств на основе источников неизменного тока. 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. Показано, что преобразователь частоты на основе источников неизменного тока позволяет обеспечить УМС двух систем с разными стандартами по поддержанию частоты.

На основе ФРТ, выполненного по схеме «многоугольник» и источников неизменного тока разработано новое управляемое компенсирующее устройство. Показана его эффективность при обеспечении широкого диапазона регулирования реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера.

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».

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

БИБЛИОГРАФИЯ

1. 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
2. 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).
3. Amin S. M., Wollenberg B. F. Toward a Smart Grid. — IEEE P&E Magazine, September/October, 2005
4. BakerR.; Guth G.; Egli W.; EglinP. Control Algorithm for a Static Phase Shifting Transformer to Enhance Transient and Dynamic Stability of Large Power Systems IEEE Power Engineering Review (Volume: PER-2 , Issue: 9 , Sept. 1982) **Page(s):** 70 – 71 DOI: 10.1109/MPER.1982.5519515
5. Balyberdin L. L. i dr. Uvelichenie moshchnosti ehlektroperedachi 330/400 kV s vstavkoj postoyannogo toka mezhdu ehnergosistemami Rossii i Finlyandii.[Increasing the power of 330 / 400kV transmission with a back-to-back HVDC converter station between the power systems of Russia and Finland] EHlektricheskie stancii, 2004, № 10.pp. 50-54. (In Russian).
6. Beauregard F.; Brochu J.; Morin G.; Pelletier P. Interphase power controller with voltage injection IEEE Transactions on Power Delivery(Volume: 9,Issue: 4, Oct 1994**Page(s):**1956–1962 DOI: 10.1109/61.329527
7. Beňa Ľ., Buczek K., Rydz P., Wachta H. Active Power Flow Control on Cross-Border Connections Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems pp 185-206 21 October 2017
8. BladowJ.K.; MontoyaA.H.Experiences with parallel EHV phase shifting transformers IEEE Transactions on Power Delivery(Volume: 6,Issue: 3, Jul 1991) **Page(s):**1096– 1100 DOI:10.1109/61.85853
9. Bosneaga, V.A.; Suslov, V.M.; Postolaty, V.M. Mathematical Model of Flexible Alternating Current Link Based on Phase-Shifting Transformer with Circular Phase Angle Rotation. 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems Conference SIELMEN 2015. pp.171-176, ISBN 978-606-567-284-0
10. Bresesti P., Sforna M., Allegranza V., Canever D., and Vailati R.; Application of Phase Shifting Transformers for a secure and efficient operation of the interconnection corridors.
11. Breuer W., Hartmann V., Povh D., Retzmann D., Teltsch E.,"Application of HVDC for large power system interconnections". B4-106, Session 2004, CIGRÉ
12. Brochu J., Pelletier P., Beauregard F., Morin G.The interphase power controller: a new concept for managing power flow within AC networks IEEE Transactions on Power Delivery(Volume: 9,Issue: 2, Apr 1994) DOI: 10.1109/61.296264
13. Brochu J., Beauregard F., Cloutier R., Bergeron A., Garant L. (Hydro-Quebec, Canada), F.Sirois (Ecole Polytechnique de Montreal), M.I.Henderson (ISO New England, USA). Innovative applications of phase-shifting transformers supplemented with series reactive elements. CIGRE, 2006, A2-203 (плавка гололеда , реактив, IPC
14. Brochu J., Beauregard F., Morin G., Lemay J., Pelletier P., Kheir S. "The IPC technology – a new approach for substation uptating with passive short-circuit limitation", IEEE Transactions PWRD, Vol.13, No.1
15. Brochu J., Beauregard F., Morin G., Lemy J., Pelletier P.and Thallam RS "Application of the interphase power controller technology for transmission line power flow control", IEEE Transactions PWRD, Vol.12, No.2.
16. Brochu J., Pelletier P., Beauregard F., Morin G.,"The Interphase Power Controller-A New Concept for Managing Power Flow Within AC Networks", IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9, No. 2, Apil 1994.

17. Bryancev A.M., Bryancev M.A., Dyagileva S.V., Karymov R.R., Lur'e A.I.,Maklecova E.E., Negryshev A.A. Reguliruemye istochniki reaktivnoj moshchnosti s upravlyaemymi podmagnichivaniem shuntiruyushchimi reaktorami i batareyami kondensatorov. EHLEKTROTEKHNIKA 4 God: 2010
18. Calinin L., Zaitsev D., Tirsu M., Golub I. Investigation of the possibilities of increasing the frequency converter efficiency based on the phase-shift transformer. 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), 21-23 May 2019, Cluj-Napoca, Romania. (SCOPUS)
19. Calinin Lev, Zaiţev Dmitrii, Tîrşu Mihai, Golub Irina. Regulator de fază trifazat cu transformator. Hotărăre nr.4397 din 2014.03.28 de acordare a brevetului de invenţie 1
20. CardenasHans; ZhangLei; NoelJulien. 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.
21. Cardenas Hans; Zhang Lei; Noel Julien Modeling, Simulation and Application of Modular Multilevel Converter in Hybrid High Voltage Direct Current Transmission System. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA), Lima, 2018, pp.1-5. doi: 10.1109/TDC-LA.2018.8511758.
22. CarvalhoPedro M. S.; Correia Pedro F.; LuÍs A. F. M. Ferreira. Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks. IEEE Transactions on Power Systems (Volume: 23, Issue: 2, May 2008). Page(s): 766 – 772
23. Chai Yi ; Feng Xiaohui ; Zhang Ke ; Sun Jian Transient stability model and preventive control based on phase shifting transformer in power system 2015 34th Chinese Control Conference (CCC)28-30 July 2015 14 **DOI:**10.1109/ChiCC.2015.7261050 September 2015
24. Chung-Neng HuangFeature analysis of power flows based on the allocations of phase-shifting transformers. IEEE Transactions on Power Systems, Feb. 2003 **Page(s):**266–272
25. Chung-Neng Huang Preventive flow control for transient stability by phase shifting transformers 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No.03CH37495)7-12 Sept. 2003 DOI: 10.1109/TDC.2003.1335358
26. Climate Institute (USA), "North American Supergrid", Retrieved 26 January 2020. http://climate.org/wp-content/uploads/2019/09/supergrid_9_2019.pdf
27. Colak I., "Introduction to smart grid", 2016 International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP), Istanbul, 2016, pp. 1-5.
28. 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 nauchno-prakticheskoj konferencii. 2017 Izdatel'stvo: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet pp: 346-348 (In Russian).
29. DemirokErhan; GonzálezPablo Casado; Kenn H.B. Frederiksen; Dezso Sera; RodriguezPedro; TeodorescuRemus. Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids. IEEE Journal of Photovoltaics (Volume: 1, Issue: 2, Oct. 2011) Page(s): 174 – 182.
30. 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.
31. Denboer1N.; Karawita1C.; 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.
32. Dobrijević Djordje M.;Milanović Jovica V. Contribution of Phase Shifting Transformers to Improvement of the Security of Power Transfer from the Power Plant. 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)7-10 Nov. 2010 DOI: 10.1049/cp.2010.0953

33. DOĞAN Erdi, YÖRÜKEREN Nuran. Investigation of control of power flow by using phase shifting transformers: Turkey case study Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences pp2259-2275 Published Online: 19.02.2019
34. 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.
35. Ekstrom I. R. Added angles for melting Ice from power lines Electrical Engineering (Volume: 78 , Issue: 4 , April 1959) 319 – 319 DOI: 10.1109/EE.1959.6446333
36. Ekstrom I. R..More Angles of Phase Shirtaded to Previously Known Ice-Melting Methods Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems(Volume: 77,Issue: 3, April 1958) DOI: 10.1109/AIEEPAS.1958.4500178
37. El-Saady G. A variable structure static phase shifting transformer for power system stabilization. Electric Power Systems Research3 May 1999, Pages 71-78
38. 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.
39. 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
40. 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.
41. Fei Wang; Jorge L. Duarte; Marcel A. M. Hendrix. Pliant Active and Reactive Power Control for Grid-Interactive Converters Under Unbalanced Voltage Dips. IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 26, Issue: 5, May 2011) Pp: 1511 – 1521.
42. 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.
43. Flourentzou Nikolas; Agelidis Vassilios G. Georgios; DemetriadesD. 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.
44. Foata M., Rajotte Cl., Jolicoeur A. On–load tap changer reliability and maintenance strategy. ДокладСИГРЭ А2–102, 2006.
45. Gabrijel U., Mihalic R. Transient stability assessment of power systems with phase shifting transformers EUROCON 2003. Computer as a Tool. The IEEE Region 8, Volume: 2 DOI: 10.1109/EURCON.2003.1248190
46. 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.
47. Gellings C. W. The Smart Grid. Enabling Energy Efficiency and Demand Response. — CRC Press, 2010
48. Gorozhankin P.A., Majorov A.V., Makarovskij S.N., Rubcov A.A. Upravlenie napryazheniem i reaktivnoj moshchnost'yu v ehlektroehnergeticheskih sistemah. Evropejskij opyt.// EHlektricheskie stancii, 2008. №6, pp.40-47.
49. Grünbaum R., Petersson Å., and Thorvaldsson B., "FACTS, improving the performance of electrical grids," ABB Rev., pp. 11–18, Mar. 2003.
50. Hadzimuratovic Semir; Lothar Fickert Determination of critical factors for optimal positioning of Phase-Shift Transformers in interconnected systems 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)16-18 May 2018 DOI: 10.1109/EPE.2018.8396033

51. Han Z. X. Phase Shifter and Power Flow ControlIEEE Transactions on Power Apparatus and Systems(Volume: PAS-101,Issue: 10, Oct. 1982) DOI: 10.1109/TPAS.1982.317064
52. 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.
53. High Voltage Direct Current Systems General Electrica l https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/powerd_vtf/hvdc-systems_gea-31971_lr.pdf
54. Hossein Nasir Aghdam Analysis of Phase-Shifting Transformer (PST), on Congestion management and Voltage Profile in Power System by MATLAB/Simulink Toolbox Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology3(7) · July 2011
55. http://rol-elektroenergetiki.html
56. https://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_booster
57. https://mig-om.ru/novosti/rol-elektroenergetiki-v-sovremennom-mire.html
58. https://neftegaz.ru/analisis/world_market/329334-9-tendentsiy-razvitiya-mirovoy-energetiki-do-2020-goda/
59. https://otransformatore.ru/vopros-otvet/fazopovorotnyj-transformator/
60. https://standards.ieee.org/standard/519-2014.html
61. https://www.sites.google.com/site/celovekkotoryjizobreelxxvek/kakova-priroda-elektromagnitizma-v-zivyh-organizmah/terenteva-s/aktualnost-primenenia-elektricestva-v-zizni-celoveka
62. https://zen.yandex.ru/media/energovector/fazopovorotnye-transformatory-5d766fd8ba281e00ae2a3ce7
63. IEEE Smart Grid Controls: 2030 and Beyond Reference Model Year: 2014 Pp: 3-8.
64. IEEE Vision for Smart Grid Year: 2013 Pages: 1-10.
65. Ilahi Bakhsh Farhad; Mohammad Irshad; Jamil Asghar M. S. Modeling and simulation of variable frequency transformer for power transfer in-between power system networks. India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010) pp: 1-7.
66. JandaŽarko S. Pregled standarda i preporuka za kontrolu viših harmonika u električnim mrežama Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"2004, br. 16, str. 33-46.
67. Janssen M. C. The Smart Grid Drivers. — PAC, June 2010, p. 77
68. Johansson N Control of Dynamically Assisted Phase-shifting Transformers Stockholm 2008 http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:13258/fulltext01.pdf
69. KalaMeah; Sadrul Ula. Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems.2007 IEEE Power Engineering Society General Meetingpp:1–5 doi:10.1109/PES.2007.385993.
70. Kalinin L., Soldatov V. Application of the phase shifting transformers for power line ice-melting. IWAIS'90 Tokyo 1990
71. Kalinin L., Zaitcev D., Tirshu M., Golub I Simulation of the mode of frequency adjustable electric connection. WEC Central and Eastern Europe Regional Energy Forum FOREN 201612-16 June 2016, Vox Maris Grand Resort, Costinesti, Romania
72. Kalinin L., Zaitsev D., Tirsu M., Golub I.The Opportunities for Efficiency Increase of Phase-Shifting Transformers in Power Transmission Operational Modes. 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 29 September to 2 October 2019, Bucharest, Romania. (SCOPUS)
73. 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 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. c. 87-91. DOI: 10.1109/CIEM.2017.8120843, (SCOPUS);

74. 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 june 2017 г. Proceedings - 2017 International Conference on Modern Power Systems, MPS 2017 7. 2017. c. 7974381. DOI: 10.1109/MPS.2017.7974381, (SCOPUS);
75. 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.
76. Khan Rizwan M.;IqbalAtif; 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.
77. Khelfi A, Mesbah T., Djellad A.TCPST (thyristor control phase shifting transformer) impact on power quality Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) Sousse, Tunisie – 2013
78. Klapp Jaime, Jorge L Cervantes-Cota, Luis C Longoria-Gandara, Ruslan Gabbasov Energy for the Present and Future: A World Energy Overview Environmental Science and Engineeringbook series (ESE)
79. Kreikebaum Frank; Debrup Das; Yi Yang; Frank Lambert; Deepak DivanSmart Wires — A distributed, low-cost solution for controlling power flows and monitoring transmission lines2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe) Pages: 1-8. FeltesJ.W.; GemmellB.D.; RetzmannD., From Smart Grid to Super Grid: Solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting Year: 2011 Pages: 1-6.
80. Li X.N., Li T., Wang J.F., Hu T., "Impacts of ±800kV 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. Majid Farmad, Shahrokh Farhangi, S. Afsharnia, Gevork B. GharehpetianApplication of voltage source converter in Interphase Power Controller for power flow control and fault limitation April 28,2010 DOI: 10.1109/IECON.2008.4758316
83. Marinakis; Glavic M.; Van Cutsem T. Control of phase shifting transformers by multiple transmission A.system operators.**Conference**IEEE Lausanne Power Tech1-5 July 2007 DOI: 10.1109/PCT.2007.4538303
84. MerkhoufA.;UpadhyayS;DoyonP. Variable frequency transformer-an overview.Conference: Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE doi**:**10.1109/PES.2006.1709639.
85. Mihalic R.; ZunkoP. Phase-shifting transformer with fixed phase between terminal voltage and voltage boost: tool for transient stability margin enhancement IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution (Volume: 142 , Issue: 3 , May 1995) 257 – 262 DOI: 10.1049/ip-gtd:19951741
86. Mohammad Najjar , Shahrokh Farhangi, Hossein ImaneiniA Method to Control the Interphase Power Controller with Common DC Bus Electric Power Components and Systems · February 2018with256 ReadsDOI: 10.1080/15325008.2017.1362070
87. 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.
88. 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

89. 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.
90. Narain G .Hingorani. High-Voltage DC Transmission: A Power Electronics Workhouse.- IEEE Spectrum, April 1996
91. Osipov D.A. Sposoby podavleniya garmonik v sistemah ehlektrosnabzheniya. [Ways to suppress harmonics in power supply system's] Mezhdunarodnaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh Prospekt svobodnyj-2016, Krasnoyarsk, Si'irskij federal'nyj Universitet, 15-25 aprelya 2016. pp.49-52.(In Russian).
92. Pauli V.K., Vorotnikov R.A. Kompensaciya reaktivnoj moshchnosti kak ehffektivnoe sredstvo racionalnogo ispol'zovaniya ehlektroehnergii // EHnergoehkspert. – 2007. – № 2
93. Postolati V., Berzan V., Bikova E., Boșneaga V., Suslov V., ErmurachI IU. Grigoras G., Gavrilas M.,Istrate M. Posibilitățile de utilizare a dispozitivelor de reglare a fazei pentru conectarea la operare paralelă a sistemelor electroenergetice din Moldova ȘI România prin liniile de 110 kv **.***14* Regional Energy Forum , Costinesti, Romania 10-14 June 2018 ISSN-L 2284-9491
94. Pratiksha Vitthalrao Padmane and Pritee R. Rane Power quality improvement by using Interphase power controller International Journal of Current Research Vol. 7, Issue, 12, pp.24123-24127, December, 2015
95. Project DolWin2 https://powerline.net.in/2017/11/03/hvdc-gaining-ground/
96. Project North-East Agra UHVDC https://powerline.net.in/2017/11/01/transmission-superhighway/
97. Projects Jinping – Sunan https://www.nsenergybusiness.com/projects/jinping-sunan-transmission-link/
98. Prokopenko S.A. Asinhronizirovannyj ehlektromekhanicheskij preobrazovatel' chastoty. [Asynchronized electromechanical frequency converter] Aktual'nye voprosy ehnergetiki. Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii studentov, magistrantov, aspirantov. 2016 Izdatel'stvo: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet pp: 168-172. (In Russian).
99. R.Korab and R. Owczarek Impact of phase shifting transformers on cross-border power flows in the Central and Eastern Europe region Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences, Vol. 64, No. 1, 2016 DOI:10.1515/bpasts-2016-0014
100. Rafael Mihalič, Uros GabrijelTransient stability assessment of systems comprising phase-shifting FACTS devices by direct methods International Journal of Electrical Power & Energy SystemsJuly 2004, Pages 445-453
101. Rahul R.;JainAmit 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.
102. RasolomampiononaDesire,SohailAnwar Interaction between phase shifting transformers installed in the tie-lines of interconnected power systems and automatic frequency controllers International Journal of Electrical Power & Energy Systems October 2011, Pages 1351-1360
103. Ren Cloutier ; Andr Bergeron ; Jacques BrochuOn-Load Network De-Icer Specification for a Large Transmission Network IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 22 , Issue: 3 , July 2007) 1947 – 1955 DOI: 10.1109/TPWRD.2007.899772
104. RodrÍguezPedro; TimbusAdrian; Teodorescu Remus; LiserreMarco; BlaabjergFrede. Reactive Power Control for Improving Wind Turbine System Behavior Under Grid Faults. IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 24, Issue: 7, July 2009) Page(s): 1798 – 1801.
105. Seleznev A.S. Snizhenie urovnya vysshih garmonik v ehlektricheskih setyah vysokogo napryazheniya. [Reducing the level of higher harmonics in electric networks of high voltage]. Vestnik IrGTU 2014, №4 (87), pp.143-146. (In Russian).
106. Shaarbafi Karim; Transformer Modelling Guide; Year: 2017; Page: 192 - 196.

107. SharafAdel M.; KhakiBehnam, A FACTS based switched capacitor compensation scheme for smart grid applications2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications Year: 2012 Pages: 1-5.
108. 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
109. Sisi Li, Yuhong Wang, +3 authors Pengfei HeReview of De-icing Methods for Transmission Lines 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application13-14 Oct . 2010DOI:10.1109/ISDEA.2010.185
110. Sweeney R. ;Stewart G.; O'Donoghue P.; SmithP. The specification, design and protection of phase shifting transformers for the enhanced interconnection between Northern Ireland and the Republic of Ireland Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission28-30 Nov. 2001 DOI: 10.1049/cp:20010555
111. TapiaA., Tapia G., Ostolaza J.X. Reactive power control of wind farms for voltage control applications. Renewable EnergyVol. 29, Iss. 3, March 2004, Pages 377-392
112. Tirshu M., Kalinin L., Zaitsev D., Golub I., Spivak V. The model and characteristics of circular phase convertor. SIELMEN 2015 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems pp.180-184.
113. Tirsu M.,Calinin L., Zaitev D., Golub I., Kaloshin D Means and methods for active and reactive power exchange/regulation. LAP LAMBERT Academic Publishing, ISBN: 978-620-2-06664-8, 2017, 126pp
114. Verboomen J.; Papaefthymiou G.; Kling W. L.; L. van der SluisUse of Phase Shifting Transformers for Minimising Congestion Risk Proceedings of the 10th International Conference on Probablistic Methods Applied to Power Systems25-29 May 2008
115. VerboomenJ.; van HertemD.; SchavemakerP.H.; Kling W.L.; BelmansR. Coordination of Phase Shifters by Means of Multi-Objective Optimisation Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference6-8 Sept. 2006 DOI: 10.1109/UPEC.2006.367514
116. VerboomenJ.; Van HertemD.; .SchavemakerP. H ; KlingW. L.; Belmans R.Border-Flow Control by means of Phase Shifting Transformers 2007 IEEE Lausanne Power Tech1-5 July 2007 DOI: 10.1109/PCT.2007.4538510
117. Vorotnickij V.E., Rabinovich M.A., Kakovskij S.K. Optimizaciya rezhimov ehlektricheskih setej 220-750 kV po reaktivnoj moshchnosti i urovnyam napryazheniya.// EHnergiya edinoj seti, 2013, №3(8), pp. 50-59
118. Wei Qiao; Ronald G. Harley; Ganesh Kumar Venayagamoorthy. Coordinated Reactive Power Control of a Large Wind Farm and a STATCOM Using Heuristic Dynamic Programming. IEEE Transactions on Energy Conversion (Volume: 24, Issue: 2, June 2009), Pp. 493 – 503.
119. YousifHakam Muayad; VuralAhmet 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.
120. Zahedi L., Mehdi S. Naderi , Mohammad S. Naderi , G. B. Gharehpetian E. Babaei. Interphase Power Controller Application to Mitigate Transmission Network Short Circuit Level RE&PQJ, Vol.1, No.9, May 2011 DOI.org/1024084/repaqj09.306
121. 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
122. Zelenohat N.I., Aristov I.S. Analiz staticheskoj ustojchivosti ehnergosistem pri nalichii gibkih mezhsistemnyh svyazej s preobrazovatelyami chastoty. [Analysis of static stability of power systems in the presence of flexible interconnections with frequency converters] EHnergetik Izdatel'stvo: Nauchno-tekhnicheskaya firma "EHnergoprogress" (Moskva) 2011, No:4 pp: 27-30. (In Russian).

123. Zhenhua Zhang, Multi-function Integrated FACTS Devices and its Application in the Development of Smart Grid2010 International Conference on Electrical and Control Engineering Year: 2010 Pages: 5349-5352.
124. Zmaznov Eugeny; LozinovaNatalya; SuslovaOlga; AndreevMikhail; Ufa Ruslan. HVDC LCC technology and power quality issues in cross-border electrical power transmission Russia — Finland. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). 2018 doi 10.1109/ISGTEurope.2018.8571805.
125. Алексеев Б.А. Контроль состояния устройств регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой // Электро. – 2008. – № 4
126. 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.
127. Асташев М.Г., Панфилов Д.И. Фазоповоротные устройства с тиристорными коммутаторами для активно-адаптивных электрических сетей // Электричество. – 2013. – № 8. – С. 60–64.
128. 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.
129. 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.
130. Булатов Р.В., Бурмейстер М.В., Кочергин А.В. [и др.] Анализ мирового опыта применения фазосдвигающих трансформаторов для управления режимами электрических сетей // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. LXXX междунар. студ. науч.-практ. конф. № 8(79). URL: https://sibac.info/archive/technic/8(79).pdf (дата обращения: 29.02.2020)
131. Голуб И. "Однотрансформаторное фазорегулирующее устройство для управления потоками мощности в электрических сетях". Problemele Energeticii Regionale 2 (31) 2016 Electroenergetică
132. Голуб И., Зайцев Д., Тыршу М. Режимы источника реактивной мощности, управляемого фазорегулирующим трансформатором. Problemele Energeticii Regionale 2 (37) 2018 Electroenergetica, pp.62-69.
133. 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.
134. Добрусин Леонид, Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике Силовая Электроника, № 4’2012 http://power-e.ru/pdf/2012_04_60.pdf
135. Евдокунин Е., Николаев Р., Искаков А. и др. Фазоповоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане / // Новости электротехники. 2007. № 6 (48). С. 38 – 41
136. Зайцев Д., Калинин Л.,Тыршу М., Голуб И. Моделирование рабочих характеристик фазорегулирующего трансформатора. «Оперативное управление в энергетике» № 6/2015 с. 21-29
137. Зеленохат Н.И., Шаров Ю.В. “Новые технологические решения проблемы совместной работы энергообъединений востока и запада” Электричество. 2007. № 9. С. 34-40.
138. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. "Моделирование характеристик двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства". Problemele energeticii regionale1(24) 2014 стр.51-62. http://journal.ie.asm.md/assets/files/08_01_24_2014.pdf
139. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. "Моделирование циклоконвертора на базе фазорегулятора с круговым преобразованием". “Интеллектуальные энергетические системы –ESS’15”9-12 июня , 2015 г.Киев, Украина

140. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. Основные режимные характеристики двухтрансформаторного фазорегулирующего устройства. Science and technology as a basis of modernization for future sustainable development SSF-2014 18-21 September 2014 - Minsk, Belarus.
141. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. Перспективы совершенствования стратегии управления процессом прямого преобразования частоты переменного тока на базе фазорегулирующего трансформатора. International Conference "Energy of Moldova – 2016. Regional Aspects of Development" 29 September – 01 October, 2016 - Chisinau, Republic of Moldova.
142. Калинин Л., Зайцев Д., Тыршу М., Голуб И. Характеристики фазоповоротного трансформатора, выполненного по схеме «многоугольник» Problemele Energeticii Regionale 3 (35) 2017 Electroenergetica pp.1-8.
143. 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
144. 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);
145. Кралин А.А., Крюков Е.В., Асабан А.А. Принципы работы тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения для распределительных сетей. Труды НГТУ им. Р.Е. АлексееваУДК 621.3
146. 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.
147. Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М., Шакарян Ю.Г. Тимашова Л.В., Карева С.Н., Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи. ЖурналИЭ №3 17 стр,
148. Постолатий В.М.; Быкова Е.В.; Тимашова Л.В.; Шакарян Ю.Г.Применение управляемых электропередач повышенной пропускной способности с устройствами фазового регулирования потоков мощности для создания интеллектуальных электроэнергетических систем. Сборник докладов 6 международного Электроэнергетического Семинара Электроэнергетического Совета стран СНГ..Москва.2011,156-176. ISBN 978-5-98908-043-4.
149. Прокопенко С.А. "Асинхронизированный электромеханический преобразователь частоты" В сборнике: Актуальные вопросы энергетики Материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов. 2016. С. 168-172.
150. 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.
151. Calinin L.; Zaitsev D., Tirshu M., Golub I., Moraru L. Transformator trifazat de reglare a decalajului de fază cu reglare în punctul neutru. Problemele energeticii regionale 1(27) 2015 pp.11-18.
152. 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.
153. Стельмаков В.Н., Жмуров В.П., Гринштейн Б.И. Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением. «Энергетик»,2010 №8

154. Суслова 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.
155. Цгоев Р.С. “ Несинхронная параллельная работа ОЭС Сибири и Востока” ЭЛЕКТРО электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1/2004, 2-6.
156. Энергетическая Стратегия Республики Молдова до 2030 года. (МО№27-30, st.№146, 05.02-2013).

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.
Режимные параметры ФРТ, по схеме «звезда»

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

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

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

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

5	0,42	36,8	385,4	215,9	3,07	2,68	1,5
6	0,5	36,65	380,8	220,2	3,05	2,64	1,53
7	0,58	36,45	375,0	224,7	3,04	2,6	1,56
8	0,66	37,08	375,2	239,5	3,09	2,61	1,66
9	0,75	36,58	365,1	243,5	3,05	2,54	1,69
10	0,83	36,12	355,2	248,2	3,01	2,47	1,73
11	0,91	35,9	348,2	253,9	2,99	2,42	1,76
12	1,0	35,67	340,6	259,4	2,97	2,37	1,8

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

Позиция	ψ°		U_{sr},B		U_r,B	$\Delta P,Bm$
	xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-12	-59,4	-64,8	229,6	233,6	200,2	368,9
-11	-54	-59,4	214,8	219,6	199,6	376,5
-10	-50,4	-55,8	199,00	204,90	199,1	383,6
-9	-45,0	-50,4	182,40	189,30	198,3	393,7
-8	-41,4	-46,8	164,80	173,10	197,5	403,2
-7	-36,0	-41,4	146,50	155,70	197,6	403,8
-6	-30,6	-36,0	127,20	138,10	197,2	408,9
-5	-25,2	-30,6	107,20	120,10	196,8	413,4
-4	-21,6	-25,2	86,60	101,90	196,3	420,0
-3	-16,2	-19,8	65,39	83,69	195,8	425,9
-2	-10,8	-14,4	43,78	65,02	196,3	421,0
-1	-5,4	-9,0	21,84	48,76	196,3	421,1
0	1,8	-3,6	0,40	36,70	196,4	419,9
1	7,2	1,8	22,3	34,1	196,3	421,1
2	12,6	7,2	44,3	42,4	196,3	420,9
3	18,0	12,6	65,9	56,3	195,8	425,8
4	23,4	18,0	87,1	72,6	196,3	419,8
5	28,8	23,4	107,7	89,7	196,9	413,2
6	32,4	28,8	124,7	107,0	197,2	408,6
7	37,8	34,2	146,9	123,9	197,6	403,0
8	43,2	37,8	165,2	139,6	197,5	402,8
9	48,6	43,2	182,8	155,6	198,3	392,9
10	52,2	46,8	199,4	170,9	199,1	382,8
11	57,6	52,2	215,1	185,4	199,7	375,7
12	61,2	55,8	229,9	199,2	200,3	368,1

Позиция	Параметры	W'_{1q}		W''_{1q}		W_{2q}	
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-12	U,B	114,9	118	114,7	115,7	229,7	219,6
	I,A	0,27	12,13	0	12	0,12	10,45
-11	U,B	107,4	110,9	107,3	108,9	214,9	205,2
	I,A	0,27	12,13	0	12	0,12	10,66
-10	U,B	99,6	103,40	99,50	101,60	199,20	189,90
	I,A	0,27	12,130	0	12,000	0,120	10,87
-9	U,B	91,2	95,49	91,10	93,97	182,50	173,80
	I,A	0,27	12,130	0	12,000	0,120	11,07
-8	U,B	82,5	87,22	82,40	85,98	165,00	156,80
	I,A	0,27	12,120	0	12,000	0,12	11,25
-7	U,B	73,8	78,36	73,20	77,38	146,60	138,70
	I,A	0,27	12,130	0	12,000	0,130	11,43

-6	*U,B*	63,6	69,45	63,60	68,73	127,40	120,40
	I,A	0,27	12,120	0	12,000	0,130	11,59
-5	*U,B*	53,7	60,30	53,60	59,85	107,40	101,40
	I,A	0,27	12,130	0	12,000	0,130	11,73
-4	*U,B*	43,3	51,05	43,30	50,85	86,80	81,90
	I,A	0,27	12,120	0	12,000	0,130	11,84
-3	*U,B*	32,7	41,85	32,70	41,87	65,60	61,99
	I,A	0,27	12,120	0	12,000	0,130	11,93
-2	*U,B*	21,9	32,13	21,80	32,60	44,00	40,90
	I,A	0,27	12,120	0	12,000	0,130	12,00
-1	*U,B*	10,9	24,30	10,90	24,50	22,10	20,50
	I,A	0,27	12,120	0	12,000	0,130	12,00
0	*U,B*	0,27	18,43	0,15	18,30	0,00	0,14
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	12,06
1	*U,B*	11,2	17,50	11,20	16,60	22,10	20,40
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	12,040
2	*U,B*	22,1	22,00	22,10	20,31	44,00	40,60
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	12,000
3	*U,B*	32,9	29,20	32,90	27,10	65,60	59,30
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,930
4	*U,B*	43,5	37,50	43,50	35,10	86,80	78,90
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,800
5	*U,B*	53,8	46,30	53,80	43,60	107,40	97,90
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,700
6	*U,B*	63,8	55,00	63,80	52,10	127,40	116,20
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,600
7	*U,B*	73,4	63,60	73,40	60,40	146,60	133,80
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,400
8	*U,B*	82,6	71,60	82,60	68,20	165,00	149,80
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,130	11,200
9	*U,B*	91,4	79,60	91,40	76,10	182,50	166,10
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,120	11,100
10	*U,B*	99,7	87,40	99,70	83,60	199,10	181,60
	I,A	0,27	12,100	0	12,000	0,120	10,800
11	*U,B*	107,6	94,7	107,5	90,8	214,8	196,1
	I,A	0,27	12,1	0	12	0,12	10,6
12	*U,B*	115	101,7	114,9	97,6	229,6	209,9
	I,A	0,27	12,1	0	12	0,12	10,4

Позиция	Параметры	W_{1p}		W_{2p}	
		xx	нагр. R	xx	нагр. R
-12	*U,B*	199	185,1	132,6	126,8
	I,A	0,27	11,88	0,2	18,09
-11	*U,B*	203,1	188,8	124,1	118,5
	I,A	0,27	11,09	0,2	18,47
-10	*U,B*	207,10	192,40	115,00	109,60
	I,A	0,270	10,260	0,200	18,82

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

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

Режимные параметры ФРТ, по схеме "однотрансформаторный с регулированием в нейтрали"

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

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

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

Позиция	$k_y, o.e$	$U_{sc}(V)$	$\Delta P_{sc}(W)$	$\Delta Q_{sc}(VAr)$	$Z_{sc}(Ohm)$	$r_{sc}(Ohm)$	$x_{sc}(Ohm)$
10	-0.5	21.9	25.9	217.5	2.19	0.259	2.17
9	-0.45	21.1	25.7	209.4	02.11	0.257	02.9
8	-0.4	20.2	25.5	200.7	02.2	0.255	2.0
7	-0.35	19.1	25.1	189.4	1.91	0.251	1.89
6	-0.3	17.9	24.9	177.9	1.79	0.249	1.77
5	-0.25	16.4	24.3	162.2	1.64	0.243	1.62
4	-0.2	14.8	24	146.5	1.48	0.24	1.46
3	-0.15	12.9	23.3	126.9	1.29	0.233	1.27
2	-0.1	10.8	22.6	105.6	01.8	0.226	1.06
1	-0.05	08.5	22,0	82.3	0.85	0.22	0.82
0	0	8.45	20.9	82.1	0.845	0.209	0.82
-1	0.05	08.5	22.2	82.2	0.85	0.222	0.82
-2	0.1	11.3	23.0	110	1.13	0.23	1.12
-3	0.15	14.5	24.5	143.5	1.45	0.245	1.43
-4	0.2	17.8	25.6	176.2	1.78	0.256	1.76
-5	0.25	21.4	27.0	212.9	2.14	0.27	02.12

-6	0.3	25.1	28.4	250.1	2.51	0.284	2.49
-7	0.35	28.9	29.8	289.4	2.89	0.298	2.87
-8	0.4	32.7	31.1	326.5	3.27	0.311	3.26
-9	0.45	36.5	32.6	365.2	3.65	0.326	3.64
-10	0.5	40.2	34	403.3	04.2	0.34	04.1

Таблица П2.3. Результаты нагрузочных испытаний ФРТ

Позиция	ψ°		U_{sr},B		U_r,B	$\Delta P,Bm$
	xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-10	0.5	-59.4	-68.4	229.7	259.6	222.1
-9	0.45	-52.2	-61.2	206.4	235.1	222.9
-8	0.4	-45	-54	182.5	209.5	223.7
-7	0.35	-39.6	-46.8	158.4	183.3	224.5
-6	0.3	-32.4	-39.6	134.3	156.6	225.2
-5	0.25	-27	-32.4	110.4	129.8	225.8
-4	0.2	-21.6	-25.2	86.9	103.5	226.3
-3	0.15	-14.4	-18	63.9	77.6	226.8
-2	0.1	-9	-12.6	41.74	52.6	227.2
-1	0.05	-3.6	-5.4	20.4	28.6	227.5
0	0	0	-1.8	-0.333	08.5	227.6
1	-0.05	05.4	03.6	-19.4	-11.4	227.5
2	-0.1	10.8	07.2	-37.8	-27.2	227.3
3	-0.15	14.4	10.8	-55.2	-42.4	227.1
4	-0.2	18	14.4	-71.6	-56.9	226.9
5	-0.25	23.4	18.0	-86.9	-70.6	226.7
6	-0.3	27	21.6	-101.4	-83.6	226.6
7	-0.35	30.6	25.2	-114.9	-95.8	226.4
8	-0.4	32.4	28.8	-127.6	-107.5	226.3
9	-0.45	36	30.6	-139.5	-118.5	226.2
10	-0.5	39.6	34.2	-150.6	-128.9	226.1

Позиция	Параметры	W_1		W_2		W_3	
		xx	нагр. R	xx	нагр. R	xx	нагр. R
-10	U,B	265	259.3	264.8	256.7	132.5	145.8
	I,A	0.542	10.2	0	10	0.544	20.2
-9	U,B	264.6	260.7	264.5	258.1	119.1	131.5
	I,A	0.539	10.2	0	10	0.541	20.1
-8	U,B	263.4	260.9	263.2	258.3	105.3	116.7
	I,A	0.531	10.2	0	10	0.532	20
-7	U,B	261.3	260	261.1	257.4	91.4	101.4
	I,A	0.517	10.2	0	10	0.52	19.9
-6	U,B	258.5	257.9	258.3	255.4	77.5	85.9
	I,A	0.5	10.2	0	10	0.5	19.6
-5	U,B	254.9	254.9	254.8	252.4	63.7	70.4
	I,A	0.481	10.2	0	10	0.483	19.2
-4	U,B	250.8	251	250.6	248.6	50.1	55.1
	I,A	0.464	10.2	0	10	0.465	18.9
-3	U,B	246.1	246.4	245.9	244	36.9	40.1
	I,A	0.447	10.2	0	10	0.448	18.5
-2	U,B	241.1	241.1	240.9	238.7	24.1	25.6
	I,A	0.429	10.2	0	10	0.429	18.1

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

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.
Режимные параметры ФРТ, по схеме «треугольник»

Таблица П3.1. Результаты опыта холостого хода ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

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

Таблица П3.2. Результаты опыта короткого замыкания ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Поз.	$k_y, o.e$	$U_{кз}, B$	$\Delta P_{кз}, Bm$	$\Delta Q_{кз}, BAp$	$Z_{кз}, Ом$	$r_{кз}, Ом$	$x_{кз}, Ом$
-10	-1	13,9	59,24	155,9	1,16	0,41	1,08
-9	-0,9	13,47	56,77	151,3	1,12	0,39	1,05
-8	-0,8	13,04	54,19	146,8	1,09	0,38	1,02
-7	-0,7	12,61	51,45	142,2	1,05	0,36	0,99
-6	-0,6	12,39	52,22	139,2	1,03	0,36	0,97
-5	-0,5	12,2	53,14	136,3	1,02	0,37	0,95
-4	-0,4	12,06	54,32	134,1	1,01	0,38	0,93
-3	-0,3	9,12	40,46	101,7	0,76	0,28	0,71
-2	-0,2	8,82	37,9	98,82	0,74	0,26	0,69
-1	-0,1	8,59	35,51	96,73	0,72	0,25	0,67
0	0	8,44	33,37	95,53	0,7	0,23	0,66
1	0,1	8,59	35,51	96,73	0,72	0,25	0,67
2	0,2	8,82	37,9	98,82	0,74	0,26	0,69
3	0,3	9,12	40,46	101,7	0,76	0,28	0,71
4	0,4	12,06	54,32	134,1	1,01	0,38	0,93
5	0,5	12,2	53,14	136,3	1,02	0,37	0,95
6	0,6	12,39	52,22	139,2	1,03	0,36	0,97
7	0,7	12,61	51,46	142,2	1,05	0,36	0,99
8	0,8	13,04	54,19	146,8	1,09	0,38	1,02
9	0,9	13,47	56,77	151,3	1,12	0,39	1,05
10	1	13,9	59,24	155,9	1,16	0,41	1,08

Таблица П3.3. Расчетные значения суммарной активной и реактивной мощности при опыте холостого хода и короткого замыкания

Поз.	$k_y, o.e$	ψ^o	$\Delta P_\Sigma, Bm$	$\Delta Q_\Sigma, Bap$
-10	-1	-61,2	107,69	273,5
-9	-0,9	-55,8	102,14	261,2
-8	-0,8	-50,4	96,53	249,2
-7	-0,7	-45	90,89	237,33
-6	-0,6	-39,6	88,92	227,52
-5	-0,5	-32,4	87,36	218,43
-4	-0,4	-27	86,38	210,84
-3	-0,3	-18	70,75	174,04
-2	-0,2	-12,6	66,87	167,89
-1	-0,1	-5,4	63,68	163,78
0	0	1,8	61,27	161,9
1	0,1	5,4	63,98	163,78
2	0,2	12,6	66,87	167,89
3	0,3	18	70,75	174,04
4	0,4	25,2	86,38	210,84
5	0,5	30,6	87,36	218,43
6	0,6	37,8	88,92	227,52
7	0,7	43,2	90,9	237,33
8	0,8	48,6	96,53	249,2
9	0,9	54	102,14	261,2
10	1	59,4	107,69	273,5

Таблица П3.4. Результаты нагрузочных испытаний ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Поз.	ψ^o		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$	$\Delta Q, Bap$	$R_н, Ом$
	хх	нагр.	хх	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.	
-10	-61,2	-57,6	229,6	216,1	224,5	105,2	267,7	19,07
-9	-55,8	-52,2	211,7	195,6	224,7	99,87	256	19,07
-8	-50,4	-46,8	192,6	179,8	225	94,45	244,4	19,07
-7	-45	-41,4	172,1	159,7	225,3	89,09	233,3	19,06
-6	-39,6	-36	150,3	138,2	225,2	87,14	223,3	19,06
-5	-32,4	-30,6	127,4	115,5	225,2	85,88	215	19,01
-4	-27	-23,4	103,4	91,74	225,1	84,94	207,4	19
-3	-18	-21,6	78,42	86,07	226,4	69,85	171,7	19,08
-2	-12,6	-14,4	52,71	60,45	226,6	66,02	165,6	19,1
-1	-5,4	-7,2	26,49	34,37	226,8	62,95	161,9	19,1
0	1,8	1,8	0,15	8,39	227	60,57	160,1	19,12
1	5,4	7,2	26,49	34,36	226,8	62,92	161,8	19,11
2	12,6	14,4	52,71	60,45	226,6	66,02	165,6	19,1
3	18	21,6	78,42	86,07	226,4	69,85	171,7	19,08
4	25,2	27	103,4	113	225,1	85,08	207,6	18,99
5	30,6	34,2	127,4	136,8	225,2	86,07	215	19,01
6	37,8	39,6	150,3	159,6	225,2	87,55	223,6	19,04
7	43,2	46,8	172,1	181,1	225,2	89,49	233,2	19,07
8	48,6	52,2	192,6	201,4	225	94,89	244,4	19,07
9	54	57,6	211,8	220,3	224,7	100,3	256	19,07

10	59,4	63	229,6	237,9	224,5	105,6	267,6	19,08			
Поз.	Пар-ры	W'_{2q}		W''_{2q}		W_{1q}		W_{1p}		W_{2p}	
		xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.
-10	U,B	114,8	108,4	114,8	107,6	229,6	222,7	344,8	344,6	229,6	222,7
	I,A		12		11,77		10,45		7,1		10,45
-9	U,B	105,9	99,65	105,9	98,91	211,8	205,4	353,3	352,7	211,8	205,4
	I,A		12		11,78		10,7		6,56		10,7
-8	U,B	96,3	90,22	96,27	89,54	192,6	186,8	361,5	360,5	192,6	186,8
	I,A		12		11,8		10,94		5,98		10,94
-7	U,B	86,06	80,14	86,03	79,54	172,1	166,9	369,2	367,9	172,1	166,9
	I,A		12		11,82		11,17		5,36		11,17
-6	U,B	75,18	69,36	75,16	68,83	150,4	145,5	376,2	374,5	150,4	145,5
	I,A		11,99		11,82		11,36		4,69		11,36
-5	U,B	63,7	57,97	63,69	57,51	127,4	122,9	382,6	380,3	127,4	122,9
	I,A		12		11,84		11,56		4		11,56
-4	U,B	51,68	46,06	51,67	45,68	103,4	99,26	388	385,2	103,4	99,26
	I,A		12		11,85		11,7		3,27		11,7
-3	U,B	39,22	43,15	39,2	42,92	78,43	78,3	392,4	388,7	78,43	78,3
	I,A		12		11,86		11,68		2,17		11,68
-2	U,B	26,36	30,3	26,35	30,15	52,71	52,58	395,6	392,3	52,71	52,58
	I,A		12		11,86		11,8		1,41		11,8
-1	U,B	13,25	17,22	13,24	17,15	26,49	26,4	397,6	394,6	26,49	26,4
	I,A		12		11,87		11,89		0,63		11,89
0	U,B	0,08	4,21	0,09	4,18	0	0,04	398,2	395,7	0	0,04
	I,A		12		11,87		11,93		0,17		11,93
1	U,B	13,25	17,22	13,24	17,14	26,49	26,4	397,6	394,6	26,49	26,4
	I,A		12		11,87		11,88		0,63		11,88
2	U,B	26,36	30,3	26,35	30,15	52,71	52,58	395,6	392,3	52,71	52,58
	I,A		12		11,86		11,8		1,41		11,8
3	U,B	39,22	43,15	39,2	42,92	78,43	78,3	392,4	388,7	78,43	78,3
	I,A		12		11,86		11,68		1,68		11,68
4	U,B	51,69	56,66	51,67	56,35	103,4	105,3	388	382,5	103,4	105,3
	I,A		12		11,85		11,52		2,91		11,52
5	U,B	63,71	68,61	63,68	68,22	127,4	129,3	382,6	376,8	127,4	129,3
	I,A		12		11,84		11,33		3,62		11,33
6	U,B	75,19	80,02	75,16	79,55	150,4	152,2	376,2	370,3	150,4	152,2
	I,A		12		11,83		11,12		4,29		11,12
7	U,B	86,07	90,84	86,03	90,3	172,1	173,9	369,1	362,9	172,1	173,9
	I,A		12		11,81		10,89		4,93		10,89
8	U,B	96,31	101	96,27	100,4	192,6	194,3	361,5	354,7	192,6	194,3
	I,A		12		11,8		10,64		5,52		10,64

9	U, B	105,9	110,5	105,9	109,8	211,8	213,4	353,3	346	211,8	213,4
	I, A		12		11,78		10,39		6,08		10,39
10	U, B	114,8	119,3	114,8	118,6	229,6	231,2	344,8	337	229,6	231,2
	I, A		12		11,76		10,12		6,6		10,12

Таблица П3.5. Данные нагрузочных испытаний ФРТ при использовании конденсаторной батареи

Поз.	$k_y, o.e$	ψ^o		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$	$\Delta Q, BAp$	$I_н, A$	$I_к, A$	$R_н, Ом$
		xx	нагр.	xx	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.
-10	-1	-61,2	-59,4	237,5	223,3	230,7	67,81	-1366	12	6,87	19,22
-9	-0,9	-57,6	-54	218,8	205	230,1	63,92	-1135	11,92	6,31	19,3
-8	-0,8	-52,2	-48,6	198,8	185,7	229,5	60,06	-910,6	11,72	5,71	19,59
-7	-0,7	-45	-43,2	177,5	165,1	229,1	56,26	-697,5	11,39	5,08	20,11
-6	-0,6	-39,6	-37,8	154,9	143,3	228,5	53,78	-498,1	10,95	4,41	20,87
-5	-0,5	-34,2	-30,6	131,2	120,4	228,1	51,65	-319,2	10,41	3,7	21,91
-4	-0,4	-27	-25,2	106,4	96,48	227,7	49,9	-165,7	9,77	2,91	23,29
-3	-0,3	-19,8	-19,8	80,14	83	228,2	43,56	-106,5	4,33	2,55	22,64
-2	-0,2	-12,6	-12,6	53,83	57,24	228,1	41,44	0,61	5,12	1,76	24,55
-1	-0,1	-5,4	-7,2	27,04	31,04	228,1	39,84	69,19	5,92	0,95	28,53
0	0	0	0	0,27	4,87	228,2	38,85	97,06	6,73	0,15	23,9
1	0,1	5,4	7,2	27,04	31,03	228,1	39,83	69,15	5,91	0,95	28,56
2	0,2	12,6	12,6	53,83	57,24	228,1	41,42	0,57	5,11	1,76	24,2
3	0,3	19,8	19,8	80,14	83	228,2	43,56	-106,5	4,33	2,55	22,65
4	0,4	25,2	27	106,4	109,4	227,8	49,95	-247,4	3,55	3,36	24,12
5	0,5	32,4	32,4	131,2	133,5	228,3	51,79	-428,1	2,83	4,11	20,54
6	0,6	37,8	39,6	155	156,7	228,9	54,04	-621,2	2,13	4,82	20,87
7	0,7	45	45	177,5	178,6	229,4	56,63	-839,9	1,46	5,5	20,13
8	0,8	50,4	50,4	198,8	199,4	229,9	60,39	-1072	0,79	6,14	19,63
9	0,9	55,8	55,8	218,8	218,9	230,6	64,31	-1314	0,15	6,74	19,34
10	1	61,2	61,2	237,5	237,5	231,1	70,54	-1558	0,01	6,87	19,27

Поз.	Пар-ры	W'_{2q}		W''_{2q}		W_{1q}		W_{1p}		W_{2p}	
		xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.
-10	U, B	118,30	111,60	119,20	111,70	234,60	227,40	348,30	347,90	234,60	227,40
	I, A	6,86	6,83	7,31	6,87	6,02	6,10	3,92	4,22	6,02	6,10
-9	U, B	109,00	102,50	109,80	102,50	216,00	209,30	356,40	355,70	216,00	209,30
	I, A	6,33	6,88	6,73	6,87	5,68	6,27	3,30	3,92	5,68	6,27
-8	U, B	99,10	92,86	99,69	92,82	196,00	190,10	364,10	363,10	196,00	190,10
	I, A	5,76	6,92	6,12	6,87	5,27	6,42	2,70	3,58	5,27	6,42
-7	U, B	88,51	82,62	88,96	82,52	174,80	169,60	371,40	370,10	174,80	169,60
	I, A	5,14	6,95	5,46	6,87	4,80	6,55	2,12	3,22	4,80	6,55
-6	U, B	77,30	71,73	77,62	71,58	152,50	147,90	378,20	376,50	152,50	147,90
	I, A	4,49	6,97	4,77	6,87	4,26	6,67	1,58	2,83	4,26	6,67
-5	U, B	65,49	60,28	65,70	60,12	129,00	125,00	384,20	382,10	129,00	125,00
	I, A	3,80	6,99	4,03	6,87	3,66	6,77	1,09	2,42	3,66	6,77

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

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

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

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

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

Поз.	$U_{кз}, B$	$\Delta P_{кз}, Bm$	$\Delta Q_{кз}, BAp$	$Z_{кз}, Ом$	$r_{кз}, Ом$	$x_{кз}, Ом$
-12	5,610	44,76	49,88	0,468	0,311	0,350
-11	5,575	44,11	49,85	0,464	0,306	0,349
-10	5,575	43,78	50,36	0,464	0,304	0,351
-9	5,650	44,39	50,87	0,471	0,308	0,356
-8	5,750	45,16	51,76	0,479	0,314	0,362
-7	5,510	42,34	50,44	0,459	0,294	0,352
-6	5,571	42,06	51,66	0,476	0,292	0,376
-5	5,645	41,75	53,00	0,470	0,290	0,370
-4	5,815	42,78	54,81	0,484	0,297	0,382
-3	6,000	43,85	56,82	0,500	0,305	0,396
-2	5,850	41,25	56,42	0,488	0,286	0,395
-1	6,000	41,29	58,69	0,500	0,287	0,409
0	6,150	41,17	60,82	0,513	0,286	0,426
1	6,400	42,53	63,68	0,533	0,295	0,444
2	6,640	43,77	66,48	0,553	0,304	0,462
3	7,150	47,17	71,35	0,596	0,328	0,498
4	7,350	47,30	74,14	0,613	0,329	0,517
5	7,560	47,46	77,03	0,630	0,330	0,537
6	7,830	48,64	80,03	0,653	0,338	0,559

7	8,120	50,02	83,41	0,677	0,347	0,581
8	8,620	53,20	88,39	0,718	0,369	0,616
9	8,845	53,37	91,40	0,737	0,371	0,637
10	9,070	53,50	94,35	0,756	0,372	0,658
11	9,380	54,98	98,12	0,782	0,382	0,682
12	9,645	55,93	101,00	0,804	0,388	0,704

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

Поз.	$\psi,^{\circ}$	$\Delta P_{\Sigma}, Bm$	$\Delta Q_{\Sigma}, BAp$
-12	0	99,78	122,64
-11	1,8	94,74	122,57
-10	5,4	90,30	122,95
-9	7,2	87,17	123,25
-8	10,8	84,56	123,84
-7	12,6	78,68	122,15
-6	16,2	75,75	122,92
-5	18,0	73,15	123,74
-4	21,6	72,26	124,95
-3	23,4	71,78	126,30
-2	27,0	68,02	125,17
-1	28,8	67,22	126,66
0	30,6	66,61	127,95
1	34,2	67,80	129,92
2	36,0	69,20	131,79
3	39,6	73,03	135,68
4	41,4	74,02	137,46
5	43,2	75,11	139,31
6	46,8	77,58	141,25
7	48,6	80,50	143,54
8	50,4	85,47	147,41
9	52,2	87,60	149,30
10	55,8	89,89	151,12
11	57,6	93,71	153,76
12	59,4	97,15	155,50

Таблица П4.4 Результаты нагрузочных испытаний ФРТ

Поз.	ψ°		U_{sr}, B		U_{r}, B	$\Delta P, Bm$
	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.
-12	0,0	0,0	0,141	5,75	226,0	102,30
-11	1,8	0,0	11,12	7,86	226,1	97,17
-10	5,4	3,64	22,19	18,19	226,1	92,41
-9	7,2	7,27	33,21	28,93	226,1	89,33
-8	10,8	9,09	44,19	39,67	226,0	86,66
-7	12,6	12,73	55,09	50,57	226,3	80,58
-6	16,2	14,55	65,89	61,18	226,3	77,53
-5	18,0	18,18	76,58	71,67	226,3	74,91
-4	21,6	20,0	87,15	82,0	226,2	73,94
-3	23,4	21,82	97,58	92,18	226,2	73,36
-2	27,0	25,45	107,9	102,40	226,4	69,62
-1	28,8	27,27	118,0	112,30	226,4	68,68
0	30,6	30,91	127,90	122,0	226,4	68,14
1	34,2	32,73	137,60	131,40	226,3	69,12
2	36,0	34,55	147,10	140,70	226,2	70,43

3	39,6	38,18	156,50	149,50	225,8	74,22
4	41,4	40,0	165,60	158,30	225,8	74,99
5	43,2	41,82	174,50	167,0	225,8	76,08
6	46,8	45,45	183,20	175,30	225,7	78,5
7	48,6	47,27	191,60	183,50	225,6	81,14
8	50,4	49,09	199,80	191,20	225,3	86,0
9	52,2	50,91	207,80	198,90	225,3	88,02
10	55,8	52,73	215,60	206,40	225,3	90,24
11	57,6	56,36	223,10	213,60	225,2	93,60
12	59,4	58,18	230,40	220,60	225,1	97,09

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

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

	I, A		5,52		5,65		12,33		12,21
6	*U, B*	365,3	363,5	122,10	118,90	61,05	59,29	61,04	58,88
	I, A		5,78		5,6		12,33		12,20
7	*U, B*	362,1	360,3	141,20	137,40	60,51	58,73	60,50	58,30
	I, A		6,03		5,54		12,33		12,19
8	*U, B*	358,7	357,1	159,8	155,10	59,95	58,14	59,94	57,69
	I, A		6,28		5,49		12,32		12,18
9	*U, B*	355,3	353,9	178,10	172,90	59,38	57,57	59,37	57,10
	I, A		6,52		5,44		12,33		12,18
10	*U, B*	351,8	350,5	196,00	190,20	58,79	56,99	58,78	56,50
	I, A		6,76		5,38		12,34		12,18
11	*U, B*	348,3	347,2	213,40	207,00	58,20	56,39	58,19	55,89
	I, A		6,98		5,33		12,34		12,17
12	*U, B*	344,7	343,8	230,40	223,40	57,60	55,79	57,59	55,27
	I, A		7,2		5,27		12,35		12,16

Поз.	Пар-ры	W_{1p}		W'_{2p}		W''_{2p}	
		xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.
-12	*U, B*	226,1	264,7	66,51	67,45	66,51	67,46
	I, A		6,17		12,46		12,22
-11	*U, B*	243,8	242,4	60,95	61,87	60,96	61,91
	I, A		6,16		12,45		12,22
-10	*U, B*	221,5	220,1	55,36	56,27	55,37	56,34
	I, A		6,15		12,43		12,22
-9	*U, B*	199,1	197,7	49,75	50,66	49,76	50,75
	I, A		6,14		12,41		12,22
-8	*U, B*	176,6	175,3	44,13	45,04	44,14	45,17
	I, A		6,12		12,39		12,22
-7	*U, B*	154,1	152,6	38,51	39,36	38,52	39,51
	I, A		6,10		12,39		12,23
-6	*U, B*	131,7	130,4	32,90	33,77	32,92	33,96
	I, A		6,08		12,38		12,23
-5	*U, B*	109,3	108,2	27,32	28,22	27,33	28,43
	I, A		6,05		12,38		12,23
-4	*U, B*	87,11	86,21	21,76	22,71	21,77	22,94
	I, A		6,02		12,36		12,23
-3	*U, B*	65,03	64,41	16,24	17,25	16,25	17,51
	I, A		5,99		12,35		12,22
-2	*U, B*	43,11	42,43	10,76	11,75	10,77	12,03
	I, A		5,96		12,36		12,24
-1	*U, B*	21,43	21,08	5,34	6,44	5,35	6,73
	I, A		5,92		12,35		12,24
0	*U, B*	0,0003	0,024	0,037	1,59	0,038	1,69
	I, A		5,88		12,35		12,24
1	*U, B*	21,16	20,75	5,31	4,36	5,30	3,92
	I, A		5,84		12,34		12,23
2	*U, B*	42,03	41,16	10,53	9,39	10,51	8,95
	I, A		5,79		12,34		12,22
3	*U, B*	62,59	60,87	15,67	14,32	15,65	13,86

	I, A		5,74		12,32		12,21
4	U, B	82,79	80,60	20,71	19,26	20,70	18,78
	I, A		5,70		12,33		12,21
5	U, B	102,60	99,96	25,67	24,11	25,66	23,61
	I, A		5,65		12,33		12,21
6	U, B	122,10	118,90	30,54	28,85	30,52	28,33
	I, A		5,6		12,33		12,20
7	U, B	141,20	137,40	35,30	33,50	35,29	32,96
	I, A		5,54		12,33		12,19
8	U, B	159,8	155,10	39,98	37,96	39,96	37,40
	I, A		5,49		12,32		12,18
9	U, B	178,10	172,9	44,54	42,41	44,53	41,83
	I, A		5,44		12,33		12,18
10	U, B	196,00	190,20	49,00	46,76	48,99	46,16
	I, A		5,38		12,34		12,18
11	U, B	213,40	207,00	53,36	50,99	53,34	50,37
	I, A		5,33		12,34		12,17
12	U, B	230,40	223,40	57,60	55,11	57,59	54,47
	I, A		5,27		12,35		12,16

Таблица 4.6.Результаты нагрузочных испытаний ФРТ при использовании конденсаторной батареи

Поз.	ψ°		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$
	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.
-12	0,0	0,0	0,15	5,813	225,9	103,3
-11	1,8	0,0	11,24	7,949	226,1	95,52
-10	5,4	3,64	22,43	18,39	226,3	88,28
-9	7,2	7,27	33,59	29,25	226,4	82,68
-8	10,8	9,09	44,70	40,11	226,4	77,51
-7	12,6	12,73	55,71	51,12	226,8	69,84
-6	16,2	14,55	65,65	61,86	226,9	64,87
-5	18,0	18,18	77,49	72,49	227,1	60,45
-4	21,60	20,0	88,22	82,97	227,2	57,35
-3	23,40	23,64	98,81	93,30	227,2	54,67
-2	27,0	25,45	109,20	103,70	227,6	50,45
-1	29,09	27,27	119,50	113,70	227,7	48,16
0	32,73	30,91	129,60	123,60	227,9	46,37
1	34,20	32,73	139,60	133,20	228,0	45,58
2	36,0	36,36	149,30	142,70	228,1	45,19
3	40,0	38,18	159,00	151,80	228,1	46,06
4	41,82	40,0	168,30	160,90	228,3	45,91
5	45,45	43,64	177,50	169,70	228,5	46,18
6	47,27	45,45	186,40	178,40	228,7	47,23
7	49,09	47,27	195,20	186,80	228,9	48,62
8	50,91	49,09	203,80	194,80	229,0	51,06
9	54,55	52,73	212,10	202,80	229,2	52,72
10	56,36	54,55	220,10	210,60	229,5	54,70
11	58,18	56,36	228,00	218,10	229,7	57,30
12	60,0	58,18	235,60	225,4	229,9	60,17

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

Поз.	Пар-ры	W_{1q}		W_{2q}		W'_{3q}		W''_{3q}	
		хх	нагр.	хх	нагр.	хх	нагр.	хх	нагр.
-12	*U,B*	398,2	394,8	226,1	264,7	66,53	65,35	66,53	65,35
	I,A		0,23		6,24		12,60		12,35
-11	*U,B*	398,2	394,9	243,9	242,4	66,55	65,33	66,55	65,30
	I,A		0,53		6,06		12,23		12,00
-10	*U,B*	398,0	394,7	221,6	220,2	66,53	65,27	66,53	65,22
	I,A		0,84		5,87		11,87		11,66
-9	*U,B*	397,5	394,3	199,2	197,8	66,48	65,16	66,48	65,09
	I,A		1,13		5,68		11,50		11,31
-8	*U,B*	396,8	393,6	176,8	175,50	66,39	65,02	66,40	64,92
	I,A		1,41		5,49		11,14		10,97
-7	*U,B*	395,9	392,9	154,4	152,80	66,26	64,87	66,27	64,76
	I,A		1,88		5,31		10,80		10,64
-6	*U,B*	394,7	391,8	132,0	130,60	66,10	64,67	66,12	64,55
	I,A		1,89		5,13		10,46		10,31
-5	*U,B*	393,4	390,6	109,6	108,50	65,90	64,44	65,93	64,3
	I,A		2,11		4,95		10,13		9,99
-4	*U,B*	391,8	389,0	87,37	86,45	65,68	64,16	65,72	64,01
	I,A		231		4,77		9,81		9,68
-3	*U,B*	390,1	387,3	65,25	64,62	65,42	63,86	65,48	63,70
	I,A		2,48		4,59		9,49		9,38
-2	*U,B*	388,1	385,6	43,34	42,64	65,12	63,55	65,19	63,38
	I,A		2,65		4,43		9,21		9,10
-1	*U,B*	386,0	383,6	21,56	21,20	64,79	63,19	64,88	63,02
	I,A		2,80		4,27		8,93		8,84
0	*U,B*	383,7	381,4	0,008	0,017	64,44	62,81	64,55	62,63
	I,A		2,93		4,12		8,67		8,58
1	*U,B*	381,3	379,0	21,31	20,89	64,06	62,39	64,20	62,22
	I,A		3,06		3,98		8,42		8,34
2	*U,B*	378,8	376,5	42,36	41,48	63,66	61,96	63,82	61,78
	I,A		3,17		3,84		8,19		8,12
3	*U,B*	376,1	373,8	63,25	61,48	63,25	61,49	63,43	61,32
	I,A		3,28		3,72		7,98		7,92
4	*U,B*	373,3	371,1	83,72	81,47	62,80	61,02	63,00	60,85
	I,A		3,39		3,60		7,80		7,74
5	*U,B*	370,3	368,3	103,90	101,10	62,32	60,53	62,55	60,37
	I,A		3,49		3,50		7,64		7,59
6	*U,B*	367,3	365,4	123,70	120,40	61,84	60,02	62,10	59,86
	I,A		3,59		3,41		7,50		7,45
7	*U,B*	364,2	362,4	143,1	139,20	61,33	59,49	61,62	59,35
	I,A		3,69		3,33		7,39		7,34
8	*U,B*	361,0	359,3	162,30	157,40	60,83	58,96	61,14	58,82
	I,A		3,80		3,26		7,29		7,25
9	*U,B*	357,7	356,2	181,00	175,60	60,29	58,41	60,63	58,28
	I,A		3,91		3,21		7,23		7,18

10	*U,B*	354,3	353,0	199,30	193,30	59,73	57,85	60,11	57,74
	I,A		4,02		3,16		7,19		7,14
11	*U,B*	350,9	349,7	217,20	210,60	59,18	57,29	59,58	57,19
	I,A		4,15		3,12		7,16		7,12
12	*U,B*	347,5	346,4	234,70	227,50	58,61	56,71	59,05	56,63
	I,A		4,27		3,09		7,16		7,12

Поз.	Пар-ры	W_{1p}		W'_{2p}		W''_{2p}	
		xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.
-12	*U,B*	226,1	264,7	66,51	67,44	66,51	67,45
	I,A		6,24		12,60		12,35
-11	*U,B*	243,9	242,4	60,92	61,84	60,93	61,88
	I,A		6,06		12,23		12,00
-10	*U,B*	221,6	220,2	55,31	56,22	55,32	56,28
	I,A		5,87		11,87		11,66
-9	*U,B*	199,2	197,8	49,68	50,58	49,68	50,67
	I,A		5,68		11,50		11,31
-8	*U,B*	176,8	175,50	44,05	44,95	44,04	45,06
	I,A		5,49		11,14		10,97
-7	*U,B*	154,4	152,80	38,42	39,26	38,41	39,39
	I,A		5,31		10,80		10,64
-6	*U,B*	132,0	130,60	32,80	33,66	32,78	33,81
	I,A		5,13		10,46		10,31
-5	*U,B*	109,6	108,50	27,19	28,08	27,16	28,26
	I,A		4,95		10,13		9,99
-4	*U,B*	87,37	86,45	21,62	22,55	21,57	22,74
	I,A		4,77		9,81		9,68
-3	*U,B*	65,25	64,62	16,08	17,07	16,02	17,27
	I,A		4,59		9,49		9,38
-2	*U,B*	43,34	42,64	10,60	11,55	10,52	11,76
	I,A		4,43		9,21		9,10
-1	*U,B*	21,56	21,20	5,16	6,19	5,06	6,39
	I,A		4,27		8,93		8,84
0	*U,B*	0,008	0,017	0,52	1,11	0,56	1,18
	I,A		4,12		8,67		8,58
1	*U,B*	21,31	20,89	5,60	4,49	5,74	4,22
	I,A		3,98		8,42		8,34
2	*U,B*	42,36	41,48	10,85	9,62	11,01	9,37
	I,A		3,84		8,19		8,12
3	*U,B*	63,25	61,48	16,06	14,63	16,25	14,37
	I,A		3,72		7,98		7,92
4	*U,B*	83,72	81,47	21,17	19,63	21,38	19,38
	I,A		3,60		7,80		7,74
5	*U,B*	103,90	101,10	26,19	24,55	26,43	24,30
	I,A		3,50		7,64		7,59
6	*U,B*	123,70	120,40	31,12	29,36	31,39	29,12
	I,A		3,41		7,504		7,45
7	*U,B*	143,1	139,20	35,97	34,08	36,26	33,84
	I,A		3,33		7,39		7,34

8	*U,B*	162,30	157,40	40,75	38,64	41,07	38,40
	I,A		3,26		7,29		7,25
9	*U,B*	181,00	175,60	45,4	43,17	45,76	42,94
	I,A		3,21		7,23		7,18
10	*U,B*	199,30	193,30	49,96	47,61	50,34	47,39
	I,A		3,16		7,187		7,14
11	*U,B*	217,20	210,60	54,42	51,93	54,83	51,72
	I,A		3,12		7,16		7,12
12	*U,B*	234,70	227,50	58,77	56,15	59,21	55,95
	I,A		3,09		7,16		7,12

ПРИЛОЖЕНИЕ 5.
Режимные параметры ФРТ, по схеме "инвертированный многоугольник"

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

Поз.	1	2	3	4	5	6	7
U_{sr}, B	0,0952	6,71	13,51	20,41	27,42	34,53	41,74
$\psi°$	1,8	1,8	3,6	5,4	7,2	9	10,8
I_{xx}, A	0,4108	0,3992	0,3883	0,3781	0,368	0,3602	0,3525
$\Delta P, Bm$	30,74	29,91	29,13	28,4	27,74	27,13	26,58
$\Delta Q, BAp$	89,29	86,76	84,38	82,16	80,1	78,23	76,56
U_{1q}, B	398,3	401,6	404,9	408,1	411,3	414,4	417,5
$Z_{xx}, Ом$	559,88	576,15	592,33	608,30	623,81	638,53	652,48
$r_{xx}, Ом$	1720,8	1768,6	1816,0	1862,6	1906,9	1949,8	1990,2
$x_{xx}, Ом$	592,1	609,3	626,5	643,5	660,1	675,8	690,6

Таблица П5.1 Продолжение

Поз.	8	9	10	11	12	13	14	15
U_{sr}, B	49,04	56,44	63,92	71,49	79,14	86,86	94,64	102,5
$\psi°$	12,6	14,4	16,2	19,8	21,6	23,4	25,2	27
I_{xx}, A	0,3458	0,3401	0,3355	0,3319	0,3295	0,3283	0,3284	0,3298
$\Delta P, Bm$	26,11	25,71	25,38	25,14	25,08	24,9	24,92	25,03
$\Delta Q, BAp$	75,09	73,84	72,82	72,04	71,51	71,25	71,26	71,56
U_{1q}, B	420,5	423,5	426,4	429,2	431,9	434,6	437,1	439,5
$Z_{xx}, Ом$	665,12	676,27	685,54	692,98	698,03	700,58	700,37	697,39
$r_{xx}, Ом$	2026,0	2057,5	2084,3	2104,2	2109,2	2124,5	2122,7	2113,4
$x_{xx}, Ом$	704,1	716,0	725,9	733,9	739,7	742,0	741,9	738,7

Таблица П5.1 Продолжение

Поз.	16	17	18	19	20	21	22
U_{sr}, B	118,3	126,3	134,3	142,4	150,4	158,4	166,5
$\psi°$	30,6	32,4	36	37,8	49,6	41,4	43,2
I_{xx}, A	0,3366	0,3421	0,3491	0,3575	0,3674	0,3788	0,3917
$\Delta P, Bm$	25,55	25,96	26,58	27,2	27,83	28,77	29,71
$\Delta Q, BAp$	73,04	74,24	75,75	77,59	79,74	82,23	85,04
U_{1q}, B	444	446,1	448,1	449,9	451,5	453,1	454,5
$Z_{xx}, Ом$	683,3	672,3	658,8	643,3	626,0	607,1	587,1
$r_{xx}, Ом$	2070,4	2037,7	1990,2	1944,8	1900,8	1838,7	1780,5
$x_{xx}, Ом$	723,8	712,2	698,2	681,7	663,0	643,2	621,9

Таблица П5.1 Продолжение

Поз.	23	24	25	26	27	28	29	30
U_{sr}, B	174,5	182,5	190,5	198,5	206,3	214,2	221,9	229,6

$\psi°$	45	48,6	50,4	52,2	54	55,8	59,4	61,17
I_{xx}, A	0,4061	0,422	0,4393	0,4581	0,4784	0,5	0,523	0,5474
$\Delta P, Вт$	30,77	31,82	33,2	34,57	35,94	37,63	39,2	40,97
$\Delta Q, ВАр$	88,18	91,64	95,43	99,53	103,9	108,7	113,7	119
$U_{1q}, В$	455,7	456,8	457,7	458,4	459	459,4	459,6	459,7
$Z_{xx}, Ом$	566,3	545,0	523,5	502,0	480,7	460,0	439,7	420,1
$r_{xx}, Ом$	1719,2	1662,4	1593,3	1530,2	1471,9	1405,7	1349,4	1291,1
$x_{xx}, Ом$	599,8	576,9	554,3	531,5	508,6	486,8	465,1	444,3

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

Поз.	1	2	3	4	5	6	7
$U_{кз}, В$	5,396	5,506	5,576	5,725	5,815	5,855	5,965
$\Delta P_{кз}, Вт$	29,98	30,63	30,76	31,79	32,09	32,36	32,64
$\Delta Q_{кз}, ВАр$	57,33	58,82	59,37	61,23	61,71	62,58	63,62
$Z_{кз}, Ом$	0,450	0,459	0,465	0,477	0,485	0,488	0,497
$r_{кз}, Ом$	0,208	0,213	0,214	0,221	0,223	0,225	0,227
$x_{кз}, Ом$	0,399	0,407	0,413	0,423	0,430	0,433	0,442

Таблица П5.2Продолжение

Поз.	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{кз}, В$	6,124	6,274	6,482	6,473	6,673	6,873	6,972	7,172
$\Delta P_{кз}, Вт$	33,39	34,05	35,17	35,42	36,4	37,29	37,65	38,26
$\Delta Q_{кз}, ВАр$	65,63	66,99	69,31	69,44	71,56	73,57	75,08	77,24
$Z_{кз}, Ом$	0,510	0,523	0,540	0,539	0,556	0,573	0,581	0,598
$r_{кз}, Ом$	0,232	0,236	0,244	0,246	0,253	0,259	0,261	0,266
$x_{кз}, Ом$	0,455	0,466	0,482	0,480	0,495	0,511	0,519	0,535

Таблица П5.2Продолжение

Поз.	16	17	18	19	20	21	22
$U_{кз}, В$	7,672	7,902	8,371	8,591	8,871	9,421	9,711
$\Delta P_{кз}, Вт$	40,43	41,24	43,75	44,17	45,14	47,4	48,31
$\Delta Q_{кз}, ВАр$	83,02	85,13	90,82	92,86	96,09	102,5	105,8
$Z_{кз}, Ом$	0,639	0,659	0,698	0,716	0,739	0,785	0,809
$r_{кз}, Ом$	0,281	0,286	0,304	0,307	0,313	0,329	0,335
$x_{кз}, Ом$	0,574	0,593	0,628	0,647	0,669	0,713	0,736

Таблица П5.2Продолжение

Поз.	23	24	25	26	27	28	29	30
$U_{кз}, В$	10,07	10,43	10,77	11,27	11,57	11,92	12,32	12,69
$\Delta P_{кз}, Вт$	49,86	51,5	52,88	55,12	55,86	57,04	58,83	60,31
$\Delta Q_{кз}, ВАр$	110,5	114,7	118,4	124	127,1	131,2	136	140,1
$Z_{кз}, Ом$	0,839	0,869	0,898	0,939	0,964	0,993	1,027	1,058
$r_{кз}, Ом$	0,346	0,358	0,367	0,383	0,388	0,396	0,409	0,419

$x_{кз}, Ом$	0,764	0,792	0,819	0,858	0,883	0,911	0,942	0,971

Таблица П5.3. Результаты нагрузочных испытаний ФРТ

Поз.	1	2	3	4	5	6	7
$\psi°$	0	1,8	3,6	5,4	7,2	9	10,9
U_{sr}, B	5,509	3,234	8,863	15,44	22,22	29,23	36,25
U_r, B	227,3	227,3	227,2	227,2	227,1	227,1	227,1
$\Delta P, Вт$	61,69	61,23	60,86	60,87	60,98	60,27	60,25
$W_{1p}\ (U, B)$	102,1	96,29	90,36	84,32	78,18	71,84	65,49
$W_{1p}\ (I, A)$	12,37	12,46	12,55	12,64	12,73	12,82	12,91
$W_{2p}\ (U, B)$	197,4	185,7	173,8	161,6	149,3	136,5	123,8
$W_{2p}\ (I, A)$	6,03	6,085	6,14	6,193	6,247	6,302	6,355
$W_{1q}\ (U, B)$	97,29	98,04	98,77	99,49	100,2	100,9	101,6
$W_{1q}\ (I, A)$	12,37	12,46	12,55	12,64	12,73	12,82	12,91
$W_{2q}\ (U, B)$	393,6	396,9	400,1	403,3	406,4	409,6	412,7
$W_{2q}\ (I, A)$	0,236	0,4281	0,6284	0,8335	1,043	1,256	1,472
$W_{3q}\ (U, B)$	197,4	185,7	173,8	161,6	149,3	136,5	123,8
$W_{3q}\ (I, A)$	6,03	6,085	6,14	6,193	6,247	6,302	6,355

Таблица П5.3.Продолжение

Поз.	8	9	10	11	12	13	14	15
$\psi°$	12,7	14,6	16,4	18,2	20	21,8	23,6	25,2
U_{sr}, B	43,37	50,55	57,82	65,36	72,77	80,24	87,91	95,5
U_r, B	227	226,9	226,9	226,9	226,8	226,7	226,7	226,6
$\Delta P, Вт$	60,34	60,86	61,5	61,31	62,19	63,2	63,3	64,21
$W_{1p}\ (U, B)$	59,03	52,48	45,83	38,93	32,1	25,21	18,13	11,12
$W_{1p}\ (I, A)$	12,99	13,07	13,15	13,23	13,31	13,38	13,45	13,52
$W_{2p}\ (U, B)$	110,8	97,64	84,29	70,41	56,69	42,81	28,56	14,34
$W_{2p}\ (I, A)$	6,407	6,458	6,508	6,559	6,607	6,653	6,701	6,746
$W_{1q}\ (U, B)$	102,3	102,9	103,5	104,2	104,8	105,3	105,9	106,4
$W_{1q}\ (I, A)$	12,99	13,07	13,15	13,23	13,31	13,38	13,45	13,52
$W_{2q}\ (U, B)$	415,7	418,5	421,3	424,2	426,9	429,4	432	434,4
$W_{2q}\ (I, A)$	1,692	1,914	2,14	2,37	2,602	2,836	3,074	3,313
$W_{3q}\ (U, B)$	110,8	97,64	84,29	70,41	56,69	42,81	28,55	14,34
$W_{3q}\ (I, A)$	6,407	6,456	6,508	6,559	6,607	6,653	6,701	6,746

Таблица П5.3.Продолжение

Поз.	16	17	18	19	20	21	22
$\psi°$	29	30,9	32,7	36,4	38,2	40	41,8
U_{sr}, B	110,8	118,5	126	133,8	141,5	149	156,7
U_r, B	226,4	226,3	226,1	226	225,9	225,7	225,6
$\Delta P, Вт$	66,77	68,43	70,96	72,52	74,21	77,09	79,05
$W_{1p}\ (U, B)$	4,025	10,91	18,03	25,36	32,75	39,97	47,42

$W_{1p}\ (I,A)$	13,65	13,7	13,75	13,8	13,84	13,88	13,91
$W_{2p}\ (U,B)$	14,45	29,02	43,45	58,22	73,06	87,54	102,5
$W_{2p}\ (I,A)$	6,83	6,869	6,904	6,94	6,974	7,002	7,031
$W_{1q}\ (U,B)$	107,3	107,7	108,1	108,5	108,8	109,1	109,3
$W_{1q}\ (I,A)$	13,65	13,7	13,75	13,8	13,84	13,88	13,91
$W_{2q}\ (U,B)$	438,8	440,8	442,6	444,4	446,1	447,4	448,8
$W_{2q}\ (I,A)$	3,798	4,043	4,287	4,535	4,784	5,031	5,28
$W_{3q}\ (U,B)$	14,45	29,02	43,45	58,22	73,06	87,54	102,5
$W_{3q}\ (I,A)$	6,83	6,869	6,904	6,94	6,974	7,002	7,031

Таблица П5.3.Продолжение

Поз.	23	24	25	26	27	28	29	30
$\psi°$	43,6	45,5	47,3	50,9	52,2	54	55,8	57,8
U_{sr},B	164,4	172,1	179,7	187,1	194,7	202,2	209,6	216,9
U_r,B	225,5	225,3	225,2	225	224,8	224,7	224,5	224,4
$\Delta P,Bm$	81,13	83,73	86,45	90,02	92,57	95,22	98,37	101,6
$W_{1p}\ (U,B)$	54,9	62,37	69,85	77,19	84,66	92,11	99,51	106,9
$W_{1p}\ (I,A)$	13,94	13,97	13,99	14	14,01	14,01	14,01	14
$W_{2p}\ (U,B)$	117,5	132,4	147,4	162,1	177,1	192	206,8	221,5
$W_{2p}\ (I,A)$	7,058	7,082	7,103	7,119	7,135	7,149	7,16	7,167
$W_{1q}\ (U,B)$	109,6	109,7	109,9	110	110,1	110,1	110,1	110
$W_{1q}\ (I,A)$	13,94	13,95	13,99	14	14,01	14,01	14,01	14
$W_{2q}\ (U,B)$	450,1	451,1	452	452,7	453,3	453,8	454,1	454,2
$W_{2q}\ (I,A)$	5,53	5,779	6,026	6,272	6,518	6,763	7,006	7,246
$W_{3q}\ (U,B)$	117,5	132,4	147,4	162,1	177,1	192	206,8	221,5
$W_{3q}\ (I,A)$	7,058	7,082	7,103	7,119	7,135	7,149	7,16	7,167

Таблица П5.4.Результаты нагрузочных испытаний ФРТ при использовании конденсаторной батареи

Поз.	1	2	3	4	5	6	7
$I_{ФПТ},A$	11,98	11,78	11,57	11,36	11,14	10,94	10,72
$I_к,A$	0,165	0,117	0,292	0,49	0,70	0,92	1,14
$\psi°$	0	1,8	3,6	5,4	7,2	9	10,8
U_{sr},B	5,393	3,831	9,509	16,15	23,01	30	37,11
U_r,B	226,9	226,9	226,9	226,9	226,9	227,1	227,2
$\Delta P,Bm$	35,44	80,14	125,6	172,7	220,5	266,4	314,7
$W_{1p}\ (U,B)$	101,7	95,82	89,85	83,77	77,58	71,3	64,9
$W_{1p}\ (I,A)$	12,16	12,05	11,93	11,8	11,66	11,53	11,38
$W_{2p}\ (U,B)$	196,6	185	173,1	161	148,7	136,2	123,5
$W_{2p}\ (I,A)$	5,928	5,881	5,83	5,773	5,713	5,657	5,593
$W_{1q}\ (U,B)$	97,27	98,06	98,84	99,6	100,3	101,1	101,9
$W_{1q}\ (I,A)$	12,16	12,05	11,93	11,8	11,66	11,53	11,38
$W_{2q}\ (U,B)$	393,4	396,8	400,2	403,4	406,6	409,9	413,1

$W_{2q}\ (I, A)$	0,235	0,420	0,607	0,791	0,971	1,148	1,32
$W_{3q}\ (U, B)$	196,6	185	173,1	161	148,7	136,2	123,5
$W_{3q}\ (I, A)$	5,928	5,881	5,83	5,773	5,713	5,657	5,593

Таблица П5.4.Продолжение

Поз.	8	9	10	11	12	13	14	15
$I_{ФПТ}, A$	10,5	10,28	10,06	9,845	9,621	9,399	9,191	8,978
$I_к, A$	1,36	1,58	1,81	2,04	2,27	2,51	2,74	2,98
$\psi°$	12,6	14,4	16,2	18	19,8	21,6	23,4	25,2
U_{sr}, B	44,33	51,63	59,02	66,54	74,08	81,7	89,45	97,22
U_r, B	227,2	227,2	227,2	227,4	227,4	227,4	227,7	227,7
$\Delta P, Bm$	263,4	413,4	463,6	512,4	563,3	614,2	663,8	714,4
$W_{1p}\ (U, B)$	58,4	51,79	45,08	38,28	31,38	24,4	17,32	10,18
$W_{1p}\ (I, A)$	11,23	11,06	10,89	10,73	10,55	10,37	10,2	10,01
$W_{2p}\ (U, B)$	110,5	97,36	84,01	70,46	56,73	42,82	28,7	14,43
$W_{2p}\ (I, A)$	5,526	5,453	5,378	5,308	5,229	5,148	5,073	4,993
$W_{1q}\ (U, B)$	102,6	103,3	104	104,7	105,4	106	106,7	107,3
$W_{1q}\ (I, A)$	11,23	11,06	10,89	10,73	10,55	10,37	10,2	10,01
$W_{2q}\ (U, B)$	416,2	419,2	422,1	425,2	427,9	430,6	433,4	436
$W_{2q}\ (I, A)$	1,487	1,648	1,803	1,955	2,099	2,237	2,372	2,499
$W_{3q}\ (U, B)$	110,5	97,36	84,01	70,46	56,73	42,82	28,7	14,43
$W_{3q}\ (I, A)$	5,526	5,453	5,378	5,308	5,229	5,148	5,073	4,993

Таблица П5.4.Продолжение

Поз.	16	17	18	19	20	21	22
$I_{ФПТ}, A$	8,56	8,357	8,154	7,971	7,798	7,624	7,475
$I_к, A$	3,468	3,711	3,952	4,197	4,443	4,685	4,931
$\psi°$	28,8	30,6	34,2	36	37,8	39,6	41,4
U_{sr}, B	112,9	120,8	128,6	136,6	144,6	152,5	160,5
U_r, B	227,9	227,9	227,8	228	228,1	228,1	228,3
$\Delta P, Bm$	815,6	865,9	916,2	965,2	1014	1062	1109
$W_{1p}\ (U, B)$	4,642	11,91	19,3	26,78	34,33	41,85	49,48
$W_{1p}\ (I, A)$	9,641	9,454	9,262	9,087	8,919	8,746	8,594
$W_{2p}\ (U, B)$	14,56	29,24	43,99	58,94	74	89	104,2
$W_{2p}\ (I, A)$	4,829	4,748	4,663	4,588	4,516	4,442	4,379
$W_{1q}\ (U, B)$	108,4	108,9	109,4	109,9	110,3	110,7	111,1
$W_{1q}\ (I, A)$	9,641	9,454	9,262	9,087	8,919	8,746	8,594
$W_{2q}\ (U, B)$	440,7	442,9	444,8	446,9	448,8	450,3	452
$W_{2q}\ (I, A)$	2,736	2,847	2,95	3,053	3,153	3,247	3,344
$W_{3q}\ (U, B)$	14,56	29,24	43,99	58,94	74	89	104,2
$W_{3q}\ (I, A)$	4,829	4,748	4,663	4,588	4,516	4,442	4,379

Таблица П5.4.Продолжение

Поз.	23	24	25	26	27	28	29	30
$I_{ФПТ}, A$	7,34	7,216	7,109	7,013	6,948	6,902	6,873	6,865
$I_к, A$	5,178	5,422	5,666	5,905	6,148	6,39	6,628	6,865
$\psi°$	43,2	46,8	48,6	50,4	52,2	54	57,6	59,4
U_{sr}, B	168,5	176,5	184,4	192,2	200,1	208	215,8	223,5
$U_г, B$	228,5	228,6	228,8	228,8	229,1	229,4	229,6	229,9
$\Delta P, Bm$	1154	1199	1243	1286	1327	1367	1406	1443
$W_{1p}\ (U,B)$	57,14	64,79	72,46	80,07	87,77	95,46	103,1	110,7
$W_{1p}\ (I,A)$	8,454	8,323	8,206	8,097	8,017	7,956	7,91	7,884
$W_{2p}\ (U,B)$	119,5	134,8	150,1	165,3	180,7	196	211,3	226,5
$W_{2p}\ (I,A)$	4,322	4,269	4,223	4,181	4,154	4,136	4,125	4,123
$W_{1q}\ (U,B)$	111,4	111,7	112	112,2	112,4	112,5	112,7	112,7
$W_{1q}\ (I,A)$	8,454	8,323	8,206	8,097	8,017	7,956	7,91	7,884
$W_{2q}\ (U,B)$	453,5	454,8	456	456,9	457,9	458,7	459,3	459,8
$W_{2q}\ (I,A)$	3,441	3,537	3,636	3,734	3,843	3,959	4,08	4,209
$W_{3q}\ (U,B)$	119,5	134,8	150,1	165,3	180,7	196	211,3	226,5
$W_{3q}\ (I,A)$	4,322	4,269	4,223	4,181	4,154	4,136	4,125	4,123

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.
Режимные параметры ФРТ, по схеме "модифицированный многоугольник"

Таблица П 6.1 Результаты опыта холостого хода ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Поз.	$k_y, o.e$	$\psi, ^o$	U_{sr}, B	I_{xx}, A	$\Delta P_x, Bm$	$\Delta Q_x, BAp$	$Z_{xx}, Ом$	$r_{xx}, Ом$	$x_{xx}, Ом$
-10	-1	60,0	229,80	0,46	39,60	96,90	500,00	1335,86	539,19
-9	-0,9	56,4	219,50	0,43	37,02	92,07	534,88	1428,96	576,82
-8	-0,8	54,6	209,00	0,41	34,66	87,64	560,98	1526,26	603,20
-7	-0,7	51,0	198,20	0,39	32,53	83,65	589,74	1626,19	632,82
-6	-0,6	47,4	187,20	0,37	30,66	80,10	621,62	1725,38	666,37
-5	-0,5	44,4	176,00	0,36	29,06	77,03	638,89	1820,37	682,29
-4	-0,4	42,0	164,60	0,35	27,73	74,46	666,67	1907,68	711,53
-3	-0,3	38,4	153,00	0,34	26,69	72,41	684,52	1982,02	729,41
-2	-0,2	34,8	141,30	0,33	25,94	70,89	696,97	2039,32	741,63
-1	-0,1	33,0	129,50	0,32	25,49	69,90	712,07	2075,32	758,10
0	0	29,4	117,70	0,32	25,33	69,50	716,51	2088,43	762,81
1	0,1	25,8	105,70	0,32	25,36	69,56	714,29	2085,96	760,25
2	0,2	24,0	93,77	0,33	25,69	70,19	707,69	2059,17	753,60
3	0,3	20,4	81,82	0,33	26,29	71,34	696,97	2012,17	742,96
4	0,4	16,8	69,89	0,34	27,19	73,01	678,47	1945,57	723,91
5	0,5	15,0	58,00	0,35	28,36	75,17	659,03	1865,30	704,46
6	0,6	11,4	46,19	0,36	29,78	77,80	635,36	1776,36	680,37
7	0,7	7,80	34,47	0,38	31,46	80,88	610,08	1681,50	654,69
8	0,8	6,00	22,89	0,39	33,37	84,37	582,72	1585,26	626,59
9	0,9	2,40	11,42	0,41	35,49	88,26	556,90	1490,56	600,38
10	1	0,60	0,14	0,43	37,81	92,50	534,88	1399,10	578,86

Таблица П6.2. Результаты опыта короткого замыкания ФРТ при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Поз.	$k_y, o.e$	$U_{кз}, B$	$\Delta P_{кз}, Bm$	$\Delta Q_{кз}, BAp$	$Z_{кз}, Ом$	$r_{кз}, Ом$	$x_{кз}, Ом$
-10	-1	6,95	56,58	61,01	0,58	0,39	0,43
-9	-0,9	6,74	55,17	58,92	0,56	0,38	0,41
-8	-0,8	6,52	53,51	56,65	0,54	0,37	0,40
-7	-0,7	5,87	43,9	54,72	0,49	0,30	0,38
-6	-0,6	5,67	42,4	52,84	0,47	0,29	0,37
-5	-0,5	5,48	40,94	51,1	0,46	0,28	0,36
-4	-0,4	5,3	39,52	49,48	0,44	0,27	0,35
-3	-0,3	5,13	38,14	47,99	0,43	0,26	0,34
-2	-0,2	4,57	28,41	46,59	0,38	0,20	0,33
-1	-0,1	4,42	27,04	45,23	0,37	0,19	0,32
0	0	4,3	25,94	44,34	0,36	0,18	0,31
1	0,1	4,28	26,62	43,63	0,36	0,19	0,32
2	0,2	4,27	27,3	42,97	0,36	0,20	0,33
3	0,3	4,68	36,27	42,53	0,39	0,26	0,34
4	0,4	4,73	37,23	42,48	0,39	0,27	0,35
5	0,5	4,78	38,21	42,54	0,40	0,28	0,36
6	0,6	4,83	39,03	42,54	0,40	0,29	0,37
7	0,7	4,89	39,87	42,66	0,41	0,30	0,38
8	0,8	5,43	48,57	42,94	0,45	0,37	0,40
9	0,9	5,51	49,44	43,42	0,46	0,38	0,41
10	1	5,6	50,37	44,07	0,47	0,39	0,43

Таблица 6.3. Таблица суммарных мощностей при опыте холостого хода и короткого замыкания, при управлении углом фазового сдвига с помощью силовых ключей

Поз.	$k_y, o.e$.	$\psi, ^o$	$\Delta P_\Sigma, Bm$	$\Delta Q_\Sigma, BAp$
-10	-1	-61,2	107,69	273,5
-9	-0,9	-55,8	102,14	261,2
-8	-0,8	-50,4	96,53	249,2
-7	-0,7	-45	90,89	237,33
-6	-0,6	-39,6	88,92	227,52
-5	-0,5	-32,4	87,36	218,43
-4	-0,4	-27	86,38	210,84
-3	-0,3	-18	70,75	174,04
-2	-0,2	-12,6	66,87	167,89
-1	-0,1	-5,4	63,68	163,78
0	0	1,8	61,27	161,9
1	0,1	5,4	63,98	163,78
2	0,2	12,6	66,87	167,89
3	0,3	18	70,75	174,04
4	0,4	25,2	86,38	210,84
5	0,5	30,6	87,36	218,43
6	0,6	37,8	88,92	227,52
7	0,7	43,2	90,9	237,33
8	0,8	48,6	96,53	249,2
9	0,9	54	102,14	261,2
10	1	59,4	107,69	273,5

Таблица П6.4. Результаты нагрузочных испытаний ФРТ

Поз.	ψ^o		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$	$\Delta Q, Bap$
	xx	нагр.	xx	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.
-10	60,00	58,8	229,80	223,2	225,1	95,54	155,1
-9	56,40	57	219,50	213,2	225,3	91,52	148,4
-8	54,60	53,4	209,00	202,9	225,4	87,7	142,1
-7	51,00	49,8	198,20	192,6	226,2	76,15	136,8
-6	47,40	48	187,20	181,8	226,3	72,78	131,5
-5	44,40	44,4	176,00	170,8	226,5	69,71	126,8
-4	42,00	40,8	164,60	159,6	226,6	66,94	122,7
-3	38,40	39	153,00	148,2	226,7	64,5	119,3
-2	34,80	35,4	141,30	137	226,7	53,93	116,5
-1	33,00	31,8	129,50	125,3	227,7	52,21	114,3
0	29,40	28,2	117,70	113,6	227,8	50,73	112,7
1	25,80	26,4	105,70	101,7	227,7	51,42	112,1
2	24,00	22,8	93,77	89,87	227,7	52,45	112
3	20,40	19,2	81,82	77,91	226,9	61,61	112,4
4	16,80	17,4	69,89	66,06	226,9	63,22	113,8
5	15,00	13,8	58,00	54,26	226,8	65,14	115,8
6	11,40	10,2	46,19	42,54	226,7	67,34	118,5
7	7,80	8,4	34,47	30,93	226,6	69,81	121,7
8	6,00	4,8	22,89	19,62	225,9	79,92	125,32
9	2,40	3	11,42	8,8	225,9	82,79	129,4
10	0,60	0,6	0,14	5,46	225,8	85,8	134,2

Поз.	Пар-ры	W_{1p}		W_{2p}		W_{3p1}		W_{1q}		W_{2q}	
		xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.
-10	U,B	114,9	110,9	88,76	85,79	229,8	225,2	114,9	112,4	318,8	317,7
	I,A		6,69		7,09		6,2		6,69		7,09
-9	U,B	104	100,2	80,32	77,57	208	204,4	115,6	113	320,5	319,3
	I,A		7		6,78		6,23		7		6,78
-8	U,B	92,88	89,3	71,74	69,19	185,8	182,7	116,1	113,6	322	320,8
	I,A		7,33		6,45		6,26		7,36		6,46
-7	U,B	81,61	78,31	63,03	60,75	163,2	160,8	116,6	114,3	323,3	322,6
	I,A		7,66		6,15		6,29		7,66		6,15
-6	U,B	70,19	67,08	54,21	52,12	140,4	138,4	117	114,7	324,4	323,7
	I,A		7,97		5,8		6,3		7,97		5,8
-5	U,B	58,66	55,72	45,3	43,38	117,3	115,7	117,3	115,1	325,3	324,6
	I,A		8,27		5,47		6,3		8,28		5,47
-4	U,B	47,03	44,25	36,31	34,57	94,03	92,85	117,5	115,4	326	325,2
	I,A		8,58		5,13		6,32		8,58		5,13
-3	U,B	35,32	32,71	27,27	25,69	70,62	69,79	117,1	115,6	326,4	325,7
	I,A		8,87		4,78		6,19		8,87		4,78
-2	U,B	23,56	21,09	18,18	16,75	47,1	46,63	117,8	115,9	326,6	326,3
	I,A		9,14		4,41		6,3		9,13		4,4
-1	U,B	11,79	9,48	9,08	7,8	23,55	23,33	117,7	115,9	326,5	326,3
	I,A		9,42		4,06		6,29		9,42		4,06
0	U,B	0,07	2,73	0,1	1,55	0,01	0,018	117,6	115,9	326,2	326
	I,A		9,67		3,7		6,26		9,67		3,7
1	U,B	11,72	14,09	9,083	10,28	23,48	23,33	117,4	115,7	325,7	325,4
	I,A		9,92		3,4		6,24		9,92		3,34
2	U,B	23,4	25,7	18,11	19,21	46,86	46,57	117,2	115,5	325	324,5
	I,A		46,57		2,98		6,21		10,7		2,98
3	U,B	35	37,22	27,07	28,07	70,05	69,56	116,8	115	324	323
	I,A		10,38		2,62		6,16		10,38		2,62
4	U,B	46,5	48,66	35,96	36,87	93,06	92,43	116,4	114,6	322,8	321,7
	I,A		10,61		2,27		6,13		10,61		2,27
5	U,B	57,88	59,99	44,75	45,59	115,8	115,1	115,9	114,1	321,4	320,1
	I,A		10,83		1,92		6,09		10,83		1,92
6	U,B	69,11	71,18	53,43	54,2	138,3	137,4	115,3	113,5	319,8	318,4
	I,A		11,04		1,57		6,05		11,05		1,57
7	U,B	80,17	82,21	61,99	62,69	160,4	159,5	114,6	112,9	318	316,5
	I,A		11,24		1,23		6		11,24		1,23
8	U,B	91,04	92,94	70,39	70,94	182,2	180,9	113,9	112,1	316	314
	I,A		11,43		0,89		5,95		11,43		0,89
9	U,B	101,7	103,6	78,64	79,13	203,5	202,2	113,1	111,3	313,9	311,7
	I,A		11,62		0,56		5,9		11,62		0,57
10	U,B	112,2	114	86,76	87,16	224,5	223,1	112,3	110,5	311,5	309,3
	I,A		11,79		0,25		5,85		11,79		0,25

Таблица П6.4 Результаты нагрузочных испытаний ФПТ при использовании конденсаторной батареи

Поз.	$k_y, o.e$	ψ^o		U_{sr}, B		U_r, B	$\Delta P, Bm$	$\Delta Q, BAp$	$I_н, A$	$I_к, A$
		xx	нагр.	xx	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.	нагр.
-10	-1	60,0	59,4	233,2	226,5	229,7	52,98	-1439	12,03	6,88
-9	-0,9	56,4	57,6	222,6	216,1	229,6	49,99	-1306	12,02	6,57
-8	-0,8	54,6	54	211,8	205,6	229,4	47,36	-1176	12,01	6,25
-7	-0,7	51,0	50,4	200,8	194,8	229,3	45,08	-1048	12	5,92
-6	-0,6	47,4	48,6	189,6	183,7	229,1	43,8	-923,5	11,99	5,58
-5	-0,5	45,6	45	178,2	172,4	228,9	42,94	-804,1	11,98	5,24
-4	-0,4	42,0	41,4	166,6	160,9	228,7	42,52	-690	11,97	4,89
-3	-0,3	38,4	39,6	154,6	149,9	228,8	39,23	-590,7	11,98	4,56
-2	-0,2	36,6	36	142,7	138,3	228,7	38,66	-489,3	11,98	4,2
-1	-0,1	33,0	32,4	130,8	126,5	228,7	38,44	-394,7	11,97	3,84
0	0	29,4	30	118,8	114,6	228,6	38,55	-307,2	11,97	3,48
1	0,1	25,8	26,4	106,7	102,7	228,5	39,98	-226,7	11,96	3,12
2	0,2	24,0	22,8	94,63	90,66	228,3	41,86	-154,1	11,95	2,76
3	0,3	20,4	19,2	82,55	78,65	228,2	44,19	-89,5	11,94	2,39
4	0,4	16,8	17,4	70,63	66,09	227,6	50,97	-25,5	11,91	2
5	0,5	15,0	13,8	58,61	54,2	227,5	53,16	22,21	11,91	1,65
6	0,6	11,4	10,2	46,67	42,37	227,5	55,63	61,88	11,91	1,29
7	0,7	7,80	8,4	34,82	30,64	227,4	58,38	93,47	11,91	0,93
8	0,8	6,00	4,8	23,10	19,05	227,2	62,86	117,3	11,9	0,58
9	0,9	2,40	3	11,52	7,87	227,1	67,72	133,4	11,89	0,24
10	1	0,60	0,6	0,14	5,15	226,9	72,94	142	11,88	0,16

Поз.	Пар-ры	W_{1p}		W_{2p}		W_{3p}		W_{1q}		W_{2q}	
		xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.	xx	нагр.
-10	U, B	116,9	112,5	90,15	86,86	232,4	227,6	116,3	114	320,3	320,1
	I, A		3,76		4,2		3,65		3,76		4,2
-9	U, B	105,8	101,6	81,57	78,49	210,2	205,9	116,8	114,6	321,9	321,6
	I, A		3,97		4,04		3,68		3,97		4,04
-8	U, B	94,54	90,49	72,87	69,97	187,6	183,8	117,3	115,1	323,2	323
	I, A		4,2		3,88		3,71		4,2		3,88
-7	U, B	83,12	79,25	64,04	61,33	164,8	161,4	117,7	115,5	324,4	324,2
	I, A		4,45		3,73		3,77		4,45		3,73
-6	U, B	71,56	67,82	55,11	52,54	141,7	138,6	118	115,9	325,4	325,1
	I, A		4,73		3,59		3,84		4,73		3,59
-5	U, B	59,9	56,28	46,1	43,66	118,3	115,6	118,3	116,1	326,2	325,7
	I, A		5,04		3,46		3,93		5,04		3,46
-4	U, B	48,15	44,64	37,02	34,72	94,87	92,38	118,4	116,3	326,8	326,2
	I, A		5,37		3,32		4,02		5,37		3,32
-3	U, B	36,14	33,46	27,74	26,12	70,9	70,11	118,4	116,5	326,9	326,7
	I, A		5,74		3,19		4,14		5,74		3,19

-2	*U,B*	24,3	21,75	18,59	17,11	47,27	46,78	118,4	116,5	327	326,8
	I,A		6,13		3,05		4,27		6,13		3,05
-1	*U,B*	12,46	10,02	9,44	8,09	23,62	23,39	118,3	116,5	326,9	326,7
	I,A		6,54		2,89		4,4		6,54		2,89
0	*U,B*	0,82	1,98	0,43	1,13	0,007	0,02	118,2	116,4	326,6	326,3
	I,A		6,98		2,74		4,54		6,97		2,73
1	*U,B*	11,22	13,57	8,84	10,02	23,54	23,39	117,9	116,2	326	325,6
	I,A		7,43		2,56		4,69		7,43		2,56
2	*U,B*	22,96	25,26	17,91	19,01	46,95	46,67	117,6	115,9	325,2	324,8
	I,A		7,9		2,37		4,83		7,9		2,37
3	*U,B*	34,62	36,88	26,91	27,94	70,19	69,79	117,2	115,5	324,2	323,6
	I,A		8,38		2,16		4,98		8,38		2,16
4	*U,B*	46,08	48,88	35,76	37,16	93,02	93,66	116,7	114,9	323,1	321,9
	I,A		8,87		1,93		5,13		8,87		1,93
5	*U,B*	57,53	60,27	44,59	45,91	115,8	116,3	116,1	114,4	321,6	320,5
	I,A		9,39		1,69		5,28		9,39		1,69
6	*U,B*	68,83	71,54	53,31	54,56	138,3	138,7	115,5	113,8	319,9	318,8
	I,A		9,9		1,43		5,42		9,9		1,43
7	*U,B*	79,96	82,64	61,9	63,09	160,4	160,8	114,8	113,2	318,1	316,9
	I,A		10,43		1,16		5,57		10,43		1,16
8	*U,B*	90,91	93,57	70,34	71,48	182,2	182,5	114	112,4	316,1	314,7
	I,A		10,94		0,87		5,7		10,94		0,87
9	*U,B*	101,7	104,3	78,63	79,71	203,6	203,8	113,2	111,6	313,9	312,4
	I,A		11,46		0,56		5,83		11,46		0,56
10	*U,B*	112,2	114,8	86,75	87,79	224,5	224,7	112,3	110,7	311,5	309,9
	I,A		11,97		0,25		5,95		11,97		0,25

ПРИЛОЖЕНИЕ 7
Режимные параметры ФРТ, в «гексагональной» конфигурации

Таблица П7.1 Результаты опыта холостого хода ФРТ

Поз.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
kU_{2q}, B	-220	-165	-110	-55	0	55	110	165	220
$L_{W_{2q}}, Гн$	1.258*10^{-3}	0.708*10^{-3}	0.315*10^{-3}	0.079*10^{-3}	0.026*10^{-6}	0.079*10^{-3}	0.315*10^{-3}	0.708*10^{-3}	1.258*10^{-3}
U_{sr}, B	0.206	33.2	65.8	97.4	127.6	156.1	182.7	207.3	229.3
ψ°	0.24	8.4	16.5	24.4	32.2	39.7	46.9	53.6	60
I_{xx}, A	0.535	0.417	0.329	0.274	0.25	0.254	0.284	0.334	0.401
$\Delta P_{xx}, Вт$	63.8	51.6	42.4	36.4	33.6	33.7	36.5	41.3	47.9
$\Delta Q_{xx}, ВАр$	105.1	80.8	62.9	51.6	46.7	47.8	54.1	64.7	78.8
U_{1q}, B	331.9	331	328.5	324.4	318.9	312.2	304.6	296.3	287.5
$Z_{xx}, Ом$	429.9	551.5	699.1	839.4	920	905.5	809.8	688.6	573.6
$r_{xx}, Ом$	829.1	1025.2	1247.6	1453.3	1574.4	1569.7	1449.3	1280.9	1104.4
$x_{xx}, Ом$	502.8	654.1	844.1	1028.3	1133.7	1108.5	976.4	816.6	671.2

Таблица П7.2 Результаты опыта короткого замыкания ФРТ

Поз.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L_{W_{2q}}, Гн$	1.258*10^{-3}	0.708*10^{-3}	0.315*10^{-3}	0.079*10^{-3}	0.026*10^{-6}	0.079*10^{-3}	0.315*10^{-3}	0.708*10^{-3}	1.258*10^{-3}
$U_{кз}, B$	9.6	9.1	8.7	8.5	8.5	8.7	8.95	9.4	9.9
$\Delta P_{кз}, Вт$	57.3	57	55.7	54.7	54.1	54.2	53.3	53.5	53.3
$\Delta Q_{кз}, ВАр$	99.6	93.5	88.2	85.7	86.1	89.6	93.1	99.8	106.6
$Z_{кз}, Ом$	0.8	0.758	0.725	0.708	0.708	0.725	0.746	0.783	0.825
$r_{кз}, Ом$	0.398	0.396	0.387	0.38	0.376	0.376	0.37	0.372	0.37
$x_{кз}, Ом$	0.694	0.646	0.613	0.597	0.599	0.619	0.648	0.689	0.737

Таблица П7.3 Результаты нагрузочных испытаний ФРТ

Поз.		1		2		3		4		5	
$L_{(W_{2q})}, Гн$		1.26*10^{-3}		0.708*10^{-3}		0.315*10-3		0.079*10-3		0.026*10-6	
ψ°_{ref}	xx	.6		7.8		16.8		24.		31.2	
ψ°	н	0.		7.2		16.2		23.5		32.4	
U_{sr}, B	xx	.209		33.2		65.8		97.4		127.6	
	н	6.1		28.9		61.5		93.		123.1	
U_r, B	н	226.1		226.2		226.3		226.4		226.5	
$\Delta P, Вт$	н	108.3		95.		85.		78.3		75.	
Пар-ры		U, B	I, A	U, B	I, A	U, B	I, A	U, B	I, A	U, B	I, A
W_{1p}	xx	-265.3		-198.5		-131.3		-64.9		.128	
	н	-265.8	5.9	-198.4	5.9	-130.9	5.9	-64.4	5.8	1.2	5.8
W'_{2p}	xx	-66.3		-49.6		-32.8		-16.2		0.05	
	н	-67.7	12.3	-50.8	12.2	-33.9	12.2	-17.3	12.2	1.8	12.2

W''_{2p}	xx	-66.3		-49.6		-32.8		-16.2		0.05	
	н	-67.7	12.	-50.9	12.	-34.1	12.	-17.5	12.	1.8	12.
W_{1q}	xx	331.9		331.		328.		324.4		318.9	
	н	329.6	.31	329.1	1.2	326.9	2.2	323.	3.1	317.8	4.
W_{2q}	xx	265.3		198.5		131.3		64.9		.128	
	н	265.8	5.8	198.4	5.9	130.9	5.9	64.4	5.8	1.2	5.8
W_{3q}	xx	132.7		132.4		131.4		129.7		127.5	
	н	130.6	12.	130.3	11.5	129.2	10.9	127.6	10.3	125.4	9.6

Таблица П7.3Продолжение

Поз.		6		7		8		9	
$L_{(W_{2q})}, Гн$		0.079*10-3		0.315*10-3		0.708*10-3		1.26*10-3	
ψ°_{ref}	xx	40.2		47.4		52.8		60.	
ψ°	н	39.6		46.8		52.4.		58.6	
U_{sr}, B	xx	156.1		182.7		207.3		229.9	
	н	151.2		177.4		201.5		223.5	
U_r, B	н	226.5		226.5		226.5		226.5	
$\Delta P, Вт$	н	74.7		77		81.5		87.7	
Пар-ры		U, B	I, A	U, B	I, A	U, B	I, A	U, B	I, A
W_{1p}	xx	62.4		121.8		177.7		229.8	
	н	61.7	5.7	120.	56.	174.6	5.5	225.3	5.4
W'_{2p}	xx	15.6		30.5		44.4		57.5	
	н	14.5	12.2	29.1	12.2	42.8	12.2	55.6	12.2
W''_{2p}	xx	15.6		30.4		44.4		57.4	
	н	14.1	12.	28.6	12.	42.3	12.	54.9	12.
W_{1q}	xx	312.2		304.6		296.3		287.5	
	н	311.4	4.8	304.1	5.7	296.2	6.4	287.8	7.2
W_{2q}	xx	62.4		121.8		177.7		229.8	
	н	61.7	5.7	120.	5.6	174.6	5.5	225.3	5.4
W_{3q}	xx	124.9		121.8		118.5		115.	
	н	122.7	8.9	119.7	8.2	116.5	7.5	113.	6.8

Таблица П7.4.Результаты нагрузочных испытаний ФРТ при использовании конденсаторной батареи

Поз.		1	2	3	4
ψ°_{ref}	xx	.6	4.2	9.6	13.2
ψ°	н	.6	4.8	10.2	13.8
U_{sr}, B	xx	.2	19.3	38.3	57.2
	н	3.	17.3	36.	54.4
U_r, B	н	227.6	227.8	228.1	227.8
$\Delta P, Вт$	н	60.5	55.9	51.	49.4
$R_н, Ом$		40.8	36.2	32.6	29.5
I_r, A	н	5.6	6.3	7.	7.7

$I_к, A$	xx	0.		.5		1.1		1.6	
	н	.1		.5		1.		1.5	
Пар-ры		$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$
W_{1p}	xx	-265.5	.2	-227.3	.3	-188.9	.5	-150.3	.8
	н	-265.2	2.9	-227.	3.	-188.6	3.	-150.4	3.1
W'_{2p}	xx	-66.4	.5	-56.8	.5	-47.1	.9	-37.5	1.4
	н	-66.8	5.9	-57.2	6.	-47.7	6.1	-38.1	6.4
W''_{2p}	xx	-66.4	0.	-56.8	.5	-47.1	1.1	-37.4	1.6
	н	-66.8	5.6	-57.3	5.8	-47.7	6.	-38.2	6.2
W_{1q}	xx	332.	.3	331.8	.3	331.	.2	329.8	.1
	н	330.6	.3	330.5	.5	329.9	.8	328.4	1.1
W''_{2q1}	xx	38	.2	38.	.4	37.9	0.	37.8	0.
	н	38.	2.7	38.	2.8	37.7	0.	37.6	0.
W''_{2q2}	xx	38.	.2	38.	0.	37.9	0.	37.8	.9
	н	38.	2.7	38.	0.	37.7	0.	37.4	3.
W'_{2q}	xx	189.5	.2	189.3	.4	188.9	.6	188.2	.9
	н	189.2	2.7	189.1	2.8	188.6	2.9	187.7	3.
W_{3q}	xx	132.8	.1	132.8	.5	132.5	1.	132.1	1.5
	н	131.7	5.7	131.6	5.7	131.3	5.7	130.6	5.7

Таблица П7.4.Продолжение

Поз.		5		6		7		8	
ψ°_{ref}	xx	18.6		24.		27.6		31.2	
ψ°	н	19.2		22.8		28.2		32.4	
U_{sr}, B	xx	75.8		93.6		111.4		128.6	
	н	72.5		90.4		107.9		125.	
U_r, B	н	227.6		227.9		228.2		228.5	
$\Delta P, Вт$	н	48.4		44.5		41.5		39.4	
$R_н, Ом$		27.		24.9		23.2		21.7	
I_r, A	н	8.4		9.2		9.8		10.5	
$I_к, A$	xx	2.1		2.6		3.1		3.6	
	н	2.1		2.6		3.		3.5	
Пар-ры		$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$
W_{1p}	xx	-111.9	1.	-74.6	1.3	-37.	1.5	0.	1.7
	н	-112.3	3.2	-74.5	3.3	-37.	3.4	0.	3.5
W'_{2p}	xx	-27.8	2.	-18.5	2.5	-9.1	3.	.4	3.5
	н	-28.6	6.5	-19.2	6.8	-9.8	7.	.8	7.3
W''_{2p}	xx	-27.8	2.1	-18.4	2.5	-9.	3.1	.4	3.6
	н	-28.7	6.4	-19.3	6.7	-9.9	6.9	.8	7.2
W_{1q}	xx	328.	.3	325.7	.5	322.8	.8	319.4	1.1
	н	326.4	1.4	324.3	1.7	321.7	2.	318.7	2.4
W''_{2q1}	xx	37.6	1.1	37.3	1.3	37.	1.5	36.6	0.
	н	37.1	3.1	37.3	3.2	37.	3.3	36.3	0.
W''_{2q2}	xx	37.6	1.1	37.3	1.3	37.	0.	36.6	0.
	н	37.1	3.1	37.3	3.2	36.7	0.	36.3	0.
W'_{2q}	xx	187.2	1.1	186.1	0.	184.5	0.	182.6	0.
	н	186.5	3.1	184.6	0.	183.	0.	181.1	0.
W_{3q}	xx	131.4	1.9	130.5	2.3	129.4	2.6	128.1	2.9
	н	129.7	5.7	128.8	5.7	127.6	5.7	126.3	5.7

Таблица П7.4.Продолжение

Поз.		9		10		11		12	
ψ°_{ref}	хх	36.6		40.2		45.6		49.2	
ψ°	н	36.		41.4		45.		48.6	
U_{sr}, B	хх	145.4		161.6		177.1		192.	
	н	141.1		156.6		171.		185.7	
U_r, B	н	228.2		228.		227.8		228.1	
$\Delta P, Bm$	н	42.5		46.8		53.		55.	
$R_н, Ом$		20.3		19.2		18.2		17.4	
I_r, A	н	11.2		11.9		12.5		13.1	
$I_к, A$	хх	4.1		4.6		5.		5.4	
	н	4.		4.4		4.8		5.2	
Пар-ры		$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$
W_{1p}	хх	36.3	1.9	71.7	2.1	105.8	2.3	139.1	2.5
	н	35.6	3.6	70.2	3.7	102.6	3.8	135.7	3.9
W'_{2p}	хх	9.3	3.9	18.1	4.4	26.6	4.8	34.9	5.2
	н	8.3	7.6	16.9	7.9	25.	8.3	33.2	8.6
W''_{2p}	хх	9.4	4.1	18.2	4.6	26.8	5.	35.1	5.4
	н	8.1	7.5	16.7	7.8	24.8	8.2	33.	8.5
W_{1q}	хх	315.9	1.4	312.1	1.7	308.1	2.1	303.4	2.4
	н	315.	2.9	311.	3.3	306.9	3.8	302.7	4.2
W''_{2q1}	хх	36.3	0.	35.8	2.1	35.4	2.2	34.9	2.3
	н	35.9	0.	35.1	3.7	35.3	3.9	34.8	3.9
W''_{2q2}	хх	36.3	1.8	35.8	2.1	35.4	2.2	34.9	0.
	н	35.6	3.6	35.1	3.7	35.3	3.9	34.4	0.
W'_{2q}	хх	180.7	0.	178.6	0.	176.6	2.2	174.	2.4
	н	178.9	0.	176.5	0.	173.1	3.9	170.5	4.
W_{3q}	хх	126.8	3.1	125.3	3.4	123.7	3.5	121.9	2.7
	н	124.7	5.7	123.	5.7	121.2	5.7	119.4	5.7

Таблица П7.4.Продолжение

Поз.		13		14		15	
ψ°_{ref}	хх	53.4		57.		60.6	
ψ°	н	52.2		55.8		59.4	
U_{sr}, B	хх	206.2		219.8		232.8	
	н	199.7		212.5		224.6	
U_r, B	н	228.4		228.2		228.	
$\Delta P, Bm$	н	58.2		67.4		78.2	
$R_н, Ом$		16.6		15.9		15.2	
I_r, A	н	13.8		14.4		15.	
$I_к, A$	хх	5.8		6.2		6.6	
	н	5.5		6.		6.4	
Пар-ры		$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$I(A)$
W_{1p}	хх	171.3	2.6	202.4	2.7	232.2	2.8
	н	167.7	4.	197.6	4.1	226.1	4.3

W'_{2p}	хх	43.	5.6	50.7	5.9	58.2	6.2
	н	41.2	9.1	48.7	9.5	55.8	10.
W''_{2p}	хх	43.2	5.8	51.	6.2	58.4	6.6
	н	41.	9.	48.4	9.4	55.5	9.9
W_{1q}	хх	298.6	2.8	293.8	3.2	289.	3.6
	н	298.3	4.8	293.5	5.4	288.6	6.
W''_{2q1}	хх	34.3	0.	33.8	0.	33.2	2.7
	н	33.8	0.	33.3	0.	32.2	4.5
W''_{2q2}	хх	34.3	0.	33.7	2.6	33.2	2.7
	н	33.8	0.	32.8	4.3	32.2	4.5
W'_{2q}	хх	171.3	2.5	168.6	2.6	165.9	2.7
	н	167.7	4.2	164.8	4.3	161.7	4.5
W_{3q}	хх	120.	3.7	118.1	3.8	116.2	3.8
	н	117.5	5.7	115.5	5.7	113.3	5.7

ПРИЛОЖЕНИЕ 8.
Результаты расчета и имитационного моделирования статических характеристик преобразователя частоты на основе источников неизменного тока (IPC)

Таблица П8.1– Таблица результатов расчета в статическом режиме

Ключи	I, II-1 III, IV-2 V, VI-1			VII, VIII-2 IX, X-2 XI, XII-1		I, II-1 III,IV-2 V,VI-1			VII, VIII-2 IX, X-1 XI, XII-1	
δ	**-0,5**	**7**	**14,5**	**22**	**29,5**	**29,5**	**37**	**44,5**	**52**	**59,5**
PS	2553	2621	2645	2625	2562	2555	2622	2647	2628	2565
QS	-655,3	-327	7,4	342,1	671,4	-660,6	-332,3	1,9	336,6	665,9
IS	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
PR	2392	2461	2486	2467	2404	2393	2462	2486	2467	2405
QR	657,2	328,6	-6,2	-341,3	-671	653,7	325,3	-9,2	-344,1	-673,6
IR	10,8	10,8	10,8	10,8	10,9	10,8	10,8	10,8	10,8	10,9
PI	334,7	332,3	324,3	310,8	292	300,1	276,3	247,9	215,6	179,7
QI	18,02	-25,4	-68,1	-109,4	-148,6	-152,9	-189,3	-222,3	-251,3	-275,9
II	2,89	2,87	2,87	2,85	2,85	2,9	2,88	2,87	2,86	2,85
PII	-339,9	-337,4	-329,3	-315,7	-296,8	-303,1	-279,3	-251	-218,6	-182,7
QII	18,4	-24,9	-67,6	-108,8	-147,9	-152,3	-188,5	-221,4	-250,3	-274,7
III	3	3	3	2,98	2,97	2,98	2,97	2,96	2,95	2,94
PIII	281,7	301,2	315,6	324,4	327,7	336,2	333,8	325,7	312,1	293
QIII	184,4	145,6	104,6	62,1	18,8	-118,6	-24,7	-67,4	-108,7	-147,8
IIII	2,86	2,85	2,84	2,83	2,82	2,85	2,85	2,84	2,83	2,83
PIV	-284	-303,6	-317,8	-326,7	-329,8	-337,1	-334,6	-326,5	-312,9	-294
QIV	184,2	145,4	104,3	61,8	18,5	18,4	-25	-67,7	-108,9	-148
IIV	2,96	2,96	2,95	2,94	2,93	2,97	2,96	2,95	2,94	2,93
UCI	203,5	195,4	186,4	176,7	166,2	168,4	157,4	145,6	133,2	120
ICI	2,98	2,87	2,74	2,6	2,45	2,49	2,33	2,17	1,99	1,81
ULI	197,4	204,3	210,2	215,3	219,4	222,5	225,6	227,8	229	229,2
ILI	2,86	2,96	3,05	3,1	3,18	3,23	3,27	3,3	3,32	3,32
UCII	121,6	108,3	94,6	80,5	66	66,5	52	37,3	22,5	8,5
ICII	1,8	1,61	1,41	1,22	1	0,99	0,79	0,59	0,41	0,27
ULII	110,8	123,2	135,2	146,6	157,4	159,5	169,5	178,7	187,2	191,9
ILII	1,61	1,79	1,96	2,1	2,28	2,31	2,46	2,59	2,7	2,83
UCIII	203,5	195,4	186,4	176,7	166,2	168,4	157,4	145,6	133,2	120,3
ICIII	2,6	2,46	2,35	2,2	2,1	2,1	1,99	1,84	1,69	1,53
ULIII	110,8	123,3	135,2	146,6	157,4	159,5	169,5	178,7	187,2	194,9
ILIII	2,6	2,46	2,35	2,23	2,1	2,1	1,99	1,84	1,69	1,53
UCIV	203,3	195,1	186,1	176,3	165,8	167,4	156,2	144,4	132	119
ICIV	2,6	2,5	2,35	2,23	2,1	2,1	1,98	1,839	1,68	1,52
ULIV	110,8	123,2	135,2	146,6	157,3	159,5	169,5	178,7	187,2	194,9
ILIV	1,4	1,55	1,7	1,84	1,98	2	2,1	2,2	2,35	2,45
U'S1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I'S1	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6
U''S1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I''S1	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,6	5,6	5,6	5,6
U'S2	113,8	113,3	112,9	112,4	112	113,7	113,3	112,9	112,5	112,2
I'S2	14	13,9	13,9	13,8	13,8	11,9	11,9	11,8	11,8	11,8
U''S2	114,1	113,8	113,6	113,3	113,1	114,3	113,9	113,6	113,2	112,9
I''S2	9	9	8,9	8,9	8,9	11,1	11,1	11,09	11,06	11
U'R1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I'R1	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,5	6,5
U''R1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230

I''R1	4,8	4,8	4,9	4,9	4,9	5,1	5,2	5,19	5,22	5,2
U'R2	117,3	116,9	116,4	115,9	115,4	117	116,6	116,1	115,6	115,1
I'R2	12,9	12,8	12,8	12,8	12,8	12,9	12,9	12,8	12,8	12,9
U''R2	117,6	117,5	117,3	117,1	116,8	117,9	117,8	117,6	117,4	117,2
I''R2	9,9	10	10	10	10	10,6	10,7	10,7	10,7	10,7
U1,3,5	114,4	114	113,6	113,2	112,8	114	113,6	113,2	112,8	112,5
U2,4,6	113,6	113,2	112,9	112,6	112,3	114	113,6	113,3	113	112,7
U7,9,11	116,9	116,6	116,3	116	115,7	116,8	116,5	116,3	116	115,7
U8,10,12	118	117,7	117,4	117	116,6	118,1	117,8	117,4	117	116,6
Ключи	I, II-1 III, IV-2 V, VI-1			VII, VIII-2 IX, X-1 XI, XII-2		I, II-2 III, IV-2 V, VI-1			VII, VIII-2 IX, X-1 XI, XII-2	
δ	**59,5**	**67**	**74,5**	**82**	**89,5**	**89,5**	**97**	**104,5**	**112**	**119,5**
PS	2555	2623	2647	2628	2566	2554	2623	2648	2629	2566
QS	-661,9	-333,7	0,7	335,4	664,7	-662,2	-333,8	0,7	335,6	665,1
IS	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,52	11,53
PR	2392	2460	2485	2466	2404	2390	2459	2484	2465	2403
QR	654,2	326	-8,3	-343,1	-672,5	657	328,9	-5,36	-340	-669,4
IR	10,8	10,8	10,8	10,8	10,85	10,78	10,79	10,8	10,82	10,85
PI	183,8	145	104	61,46	18,1	-17,2	26,3	69,1	110,4	149,7
QI	-282,5	-302,1	-316,5	-325,5	-328,8	336,7	334,2	326,1	312,5	293,6
II	2,88	2,87	2,86	2,85	2,85	2,89	2,89	2,88	2,88	2,87
PII	-186,9	-148,1	-107	-64,7	-21,4	18,3	-25,1	-67,8	-109,1	-148,3
QII	-281,4	-300,9	-315	-324	-327	338,4	335,9	327,8	314,3	295,4
III	2,98	2,97	2,96	2,95	2,94	2,96	2,96	2,95	2,95	2,94
PIII	300,2	276,4	248,1	215,7	179,8	183,9	145,1	104,1	61,6	18,3
QIII	-151,4	-187,8	-220,7	-249,6	-274,1	-281,5	-301,1	-315,4	-324	-327,6
IIII	2,87	2,86	2,85	2,84	2,8	2,87	2,86	2,85	2,84	2,83
PIV	-300,9	-277	-248,6	-216,2	-180,3	-183,7	-144,9	-103,9	-61,4	-18,1
QIV	-151,7	-188	-220,9	-249,8	-274,3	-280,5	-300	-314,3	-323,2	-326,4
IIV	2,96	2,96	2,95	2,94	2,93	2,96	2,96	2,95	2,94	2,93
UCI	121,8	108,6	94,8	80,7	66,2	222,2	225,4	227,6	228,9	229,2
ICI	1,83	1,64	1,45	1,25	1,04	3,23	3,28	3,32	3,34	3,35
ULI	232	231,3	229,5	226,8	223	54,76	69,044	83	96,7	109,9
ILI	3,36	3,35	3,33	3,29	3,23	0,79	1	1,2	1,4	1,59
UCII	11,9	12,05	24,4	38,6	52,9	226	221,4	215,8	209,3	201,9
ICII	0,4	0,43	0,54	0,7	0,88	3,28	3,22	3,14	3,06	2,96
ULII	197,3	204,1	209,9	214,9	219	66,7	52,1	37,3	22,45	7,9
ILII	2,86	2,96	3,04	3,12	3,18	0,97	0,76	0,54	0,33	0,11
UCIII	121,8	108,6	94,8	80,7	66,2	66,7	52,1	37,3	22,45	7,9
ICIII	1,55	1,39	1,22	1,04	0,87	0,9	0,73	0,56	0,41	0,29
ULIII	197,3	204,1	209,9	214,9	219	221,5	224,6	226,8	227,9	228,1
ILIII	1,55	1,39	1,22	1,04	0,87	0,9	0,73	0,56	0,41	0,29
UCIV	120,6	107,2	93,5	79,3	64,8	65	50,4	35,5	20,7	6,8
ICIV	1,53	1,36	1,19	1,01	0,83	0,88	0,72	0,57	0,45	0,37
ULIV	197,3	204,1	209,9	214,9	219	221,5	224,6	226,8	227,9	228,1
ILIV	2,48	2,56	2,64	2,7	2,75	2,78	2,82	2,85	2,86	2,86
U'S1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I'S1	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7	4,35	4,4	4,37	4,39	4,4
U''S1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I''S1	5,9	6	6	6	6	7,18	7,2	7,2	7,2	7,2
U'S2	113,6	113,2	112,9	112,6	112,3	113,9	113,6	113,4	113,1	112,9
I'S2	11,2	11,2	11,1	11,1	11,1	8,6	8,6	8,6	8,6	8,56
U''S2	114,3	113,9	113,6	113,2	112,9	114	113,5	113,1	112,6	112,3
I''S2	11,9	11,9	11,9	11,9	11,8	14,4	14,38	14,35	14,3	14,25

U'R1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I'R1	5,35	5,37	5,4	5,4	5,48	4,92	4,94	4,97	5	5,06
U''R1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I''R1	6,36	6,38	6,4	6,4	6,4	6,6	6,7	6,68	6,7	6,7
U'R2	116,4	116	115,6	115,1	114,7	116,3	115,9	115,5	115,1	114,7
I'R2	10,8	10,75	10,75	10,76	10,8	9,9	9,9	9,89	9,9	9,9
U''R2	118,5	118,3	118,1	117,9	117,5	118,6	118,4	118,2	117,9	117,5
I''R2	13,1	13,1	13,1	13,08	13,07	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6
U1,3,5	113,9	113,5	113,1	112,7	112,4	113,5	113,1	112,7	112,4	112,1
U2,4,6	114,2	113,8	113,5	113,2	112,9	114,5	114,1	113,7	113,4	113,1
U7,9,11	117	116,8	116,6	116,3	116,1	117,1	116,9	116,7	116,4	116,1
U8,10,12	118	117,6	117,2	116,8	116,8	117,8	117,4	117	116,6	116,1
Ключи	I, II-2 III, IV-1 V, VI-1			VII, VIII-2 IX, X-1 XI, XII-2		I, II-2 III, IV-1 V, VI-2			VII, VIII-2 IX, X-1 XI, XII-2	
δ	**119,5**	**127**	**134,5**	**142**	**149,5**	**149,5**	**157**	**164,5**	**172**	**179,5**
PS	2556	2624	2649	2630	2568	2554	2623	2648	2629	2566
QS	-662,7	-334,1	0,63	335,7	665,5	-657,9	-329,1	5,8	341	671
IS	11,48	11,5	11,52	11,53	11,54	11,47	11,49	11,51	11,53	11,53
PR	2390	2459	2484	2466	2404	2387	2456	2482	2463	2401
QR	658,4	330,3	-3,9	-338,7	-668,2	664,8	336,6	2,23	-332,6	-662,3
IR	10,82	10,79	10,8	10,82	10,85	10,77	10,78	10,79	10,81	10,83
PI	153,4	189,8	222,8	251,8	276,4	282,6	302,2	316,5	325,5	328,7
QI	300,4	276,6	248,2	215,7	179,7	184,6	145,7	104,6	61,9	18,5
II	2,88	2,88	2,87	2,87	2,87	2,92	2,92	2,91	2,91	2,9
PII	-152	-188,4	-221,3	-250,3	-274,8	-282,6	-302,2	-316,5	-325,4	-328,7
QII	302,4	278,5	250,2	217,8	181,9	186,7	147,9	106,9	64,3	20,94
III	2,97	2,96	2,95	2,95	2,94	2,98	2,98	2,98	2,97	2,97
PIII	-16,7	26,7	69,5	110,8	150	153	189,3	222,3	251,2	275,7
QIII	336,1	333,6	325,4	311,8	292,9	299,4	275,5	247	214,7	178,7
IIII	2,87	2,86	2,84	2,83	2,83	2,87	2,86	2,85	2,84	2,84
PIV	17	-26,4	-69,1	-110,4	-149,6	-153,4	-189,7	-222,7	-251,7	-276,2
QIV	337,3	334,9	326,8	313,2	294,3	302,1	278,2	249,8	217,4	181,4
IIV	2,95	2,95	2,95	2,94	2,93	2,96	2,96	2,95	2,95	2,95
UCI	231,9	231,2	229,5	226,8	223,2	225,8	221,2	215,6	209,2	201,8
ICI	3,37	3,37	3,34	3,31	3,26	3,31	3,24	3,17	3,08	2,98
ULI	111,4	124	136	147,5	158,3	159,9	169,9	179,2	187,8	195,5
ILI	1,62	1,8	1,97	2,14	2,3	2,32	2,46	2,6	2,72	2,84
UCII	204,4	196,2	187,2	177,4	166,8	169	157,8	146	133,6	120,5
ICII	2,98	2,88	2,75	2,63	2,49	2,52	2,38	2,22	2,07	1,911
ULII	10,88	10,93	2,64	38,1	52,6	53,12	67,3	81,2	94,8	108
ILII	0,16	0,16	0,34	0,55	0,76	0,77	0,97	1,18	1,37	1,57
UCIII	231,9	231,2	229,5	226,8	223,1	225,8	221,2	215,6	209,2	201,8
ICIII	2,9	2,91	2,89	2,85	2,8	2,84	2,78	2,72	2,64	2,55
ULIII	9,87	12,6	26,1	40,4	54,9	55,17	69,4	83,4	97,02	110,2
ILIII	2,92	2,91	2,87	2,85	2,81	2,84	2,78	2,72	2,64	2,55
UCIV	231,9	231,2	229,5	226,8	223,1	225,8	221,2	215,6	209,2	201,8
ICIV	2,92	2,91	2,89	2,87	2,83	2,85	2,8	2,74	2,67	2,59
ULIV	10,88	10,93	23,6	38,11	52,6	53,1	67,3	81,2	94,8	108
ILIV	0,14	0,13	0,29	0,48	0,66	0,67	0,85	1	1,19	1,36
U'S1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I'S1	4,14	4,14	4,15	4,17	4,2	3,55	3,55	3,55	3,55	3,57
U''S1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I''S1	7,34	7,36	7,37	7,37	7,36	8,07	8,08	8,08	8,08	8,06
U'S2	114,3	114	113,7	113,4	113,2	114,9	114,6	114,3	114	113,8

I'S2	8,29	8,24	8,2	8,16	8,15	7,21	7,14	7,08	7,03	7
U''S2	113,6	113,2	112,7	112,3	112	113,1	112,6	112,1	111,7	111,4
I''S2	14,68	14,66	14,6	14,6	14,51	16,1	16,07	16,02	15,96	15,88
U'R1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I'R1	3,75	3,78	3,8	3,85	3,9	3,69	3,7	3,72	3,75	3,79
U''R1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I''R1	7,5	7,5	7,5	7,5	7,55	7,2	7,2	7,21	7,22	7,22
U'R2	116	115,7	115,4	115,1	114,8	116,4	116,2	115,9	115,6	115,3
I'R2	7,58	7,6	7,57	7,6	7,64	7,5	7,5	7,48	7,48	7,49
U''R2	118,9	118,6	118,3	117,9	117,4	118,5	118,2	117,8	117,4	117
I''R2	15,3	15,3	15,3	15,25	15,22	14,65	14,6	14,6	14,57	14,5
U1,3,5	113,5	113,1	112,8	112,5	112,2	113,3	113	112,7	112,5	112,2
U2,4,6	114,5	114,1	113,7	113,3	113	114,6	114	113,7	113,3	112,9
U7,9,11	117,5	117,3	117,1	116,8	116,6	117,6	117,4	117,2	116,9	116,6
U8,10,12	117,5	117,1	116,7	116,2	115,8	117,3	116,9	116,5	116,1	115,7
Ключи	I, II-2 III, IV-1 V, VI-2			VII, VIII-1 IX-, X-1 XI, XII-2		I, II-2 III, IV-1 V, VI-2			VII, VIII-1 IX, X-2 XI, XII-2	
δ	**179,5**	**187**	**194,5**	**202**	**209,5**	**209,5**	**217**	**224,5**	**232**	**239,5**
PS	2556	2624	2649	2629	2567	2554	2622	2647	2627	2564
QS	-656,9	-327,9	7,13	342,5	672,6	-652,1	-323	12,1	347,5	677,6
IS	11,47	11,5	11,52	11,53	11,54	11,46	11,49	11,51	11,52	11,53
PR	2388	2457	2483	2465	2403	2387	2456	2482	2464	2402
QR	665,6	337,3	2,67	-332,4	-662,2	669,5	341	6,18	-329,1	-659,1
IR	10,78	10,78	10,8	10,81	10,84	10,78	10,78	10,79	10,81	10,83
PI	336,6	334,1	326	312,4	293,5	300,9	277	248,6	216,1	180,1
QI	18,78	-24,7	-67,5	-108,9	-148,1	-151,1	-187,5	-220,5	-249,5	-274,1
II	2,95	2,94	2,93	2,92	2,91	2,96	2,94	2,92	2,91	2,89
PII	-336,6	-334,1	-326	-312,5	-293,6	-301,7	-277,9	-249,6	-217,1	-181,2
QII	21,26	-22,2	-64,89	-106,2	-145,4	-149,7	-186,1	-219,1	-248,1	-272,6
III	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01
PIII	282,4	301,9	316,2	325	328,3	335,5	332,9	324,8	311,2	292,2
QIII	182,8	144	102,9	60,3	16,9	17,55	-25,88	-68,6	-109,9	-149,1
IIII	2,88	2,87	2,87	2,86	2,86	2,9	2,89	2,89	2,88	2,88
PIV	-282,9	-302,5	-316,8	-325,7	-329	-337,5	-335	-326,9	-313,3	-294,5
QIV	185,7	146,8	105,7	63,1	19,75	20,5	-22,95	-65,7	-107	-146,3
IIV	2,98	2,98	2,98	2,97	2,97	3	3,01	3,01	3,01	3,02
UCI	204,2	196	187,1	177,3	166,8	169	157,8	146	133,6	120,5
ICI	3,02	2,91	2,79	2,65	2,51	2,55	2,4	2,24	2,07	1,9
ULI	197,9	204,7	210,6	215,6	219,7	222,3	225,4	227,5	228,7	228,8
ILI	2,87	2,97	3,05	3,13	3,19	3,22	3,27	3,3	3,32	3,32
UCII	121,9	108,6	94,8	80,5	66	67	52,4	37,65	23	10
ICII	1,89	1,72	1,55	1,38	1,21	1,17	1	0,85	0,72	0,64
ULII	109,3	121,9	134	145,4	156,3	158,6	168,6	177,9	186,4	194,2
ILII	1,59	1,77	1,94	2,1	2,27	2,29	2,45	2,58	2,7	2,82
UCIII	204,2	196	187,1	177,3	166,7	169	157,8	146	133,6	120,5
ICIII	2,58	2,49	2,38	2,26	2,14	2,17	2,04	1,9	1,76	1,61
ULIII	111,6	124,2	136,3	147,8	158,6	160,3	170,3	179,6	188,2	196
ILIII	2,58	2,49	2,38	2,26	2,14	2,17	2,04	1,9	1,76	1,61
UCIV	204,2	196	187,1	177,3	166,7	169	157,8	146	133,5	120,5
ICIV	2,62	2,53	2,43	2,33	2,21	2,23	2,111	1,99	1,86	1,73
ULIV	109,3	121,9	134	145,4	156,3	158,6	168,6	177,9	186,4	194,2
ILIV	1,37	1,53	1,68	1,83	1,96	1	2,117	2,23	2,34	2,44
U'S1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I'S1	4,43	4,41	4,4	4,4	4,4	4,81	4,79	4,77	4,76	4,76

U''S1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I''S1	7,59	7,6	7,59	7,58	7,55	7,62	7,62	7,61	7,59	7,56
U'S2	115,2	114,8	114,5	114,2	113,8	115,5	115,1	114,7	114,4	114
I'S2	9,02	8,93	8,85	8,8	8,73	9,82	9,73	9,64	9,56	9,5
U''S2	112,7	112,3	111,9	111,6	111,3	112,4	112	111,7	111,4	111,1
I''S2	15,09	15,05	15	14,9	14,83	15,1	15,1	15	14,9	14,82
U'R1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I'R1	3,39	3,38	3,39	3,41	3,44	4,43	4,4	4,41	4,42	4,43
U''R1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I''R1	7,39	7,4	7,41	7,41	7,4	6,4	6,44	6,44	6,44	6,43
U'R2	116,6	116,4	116,2	115,9	115,6	117,3	117	116,8	116,5	116,2
I'R2	7,02	6,96	6,91	6,89	6,88	9,16	9,08	9,01	8,96	8,94
U''R2	118,3	118	117,6	117,1	116,6	117,7	117,3	116,9	116,5	116,1
I''R2	15,02	15	14,95	14,9	14,84	13,07	13,03	13	12,92	12,86
U1,3,5	113,6	113,3	113,1	114,8	112,6	113,8	113,5	113,2	113	112,8
U2,4,6	114,3	113,8	113,4	113	112,6	114,2	113,7	113,3	112,8	112,4
U7,9,11	117,9	117,7	117,4	117,1	116,7	117,9	117,6	117,3	116,9	116,5
U8,10,12	117	116,7	116,3	116	115,5	117,1	116,8	116,5	116,2	115,8
Ключи	I, II-2 III, IV-1 V, VI-2			VII, VIII-1 IX, X-2 XI, XII-1		I, II-1 III, IV-1 V, VI-2			VII, VIII-1 IX, X-2 XI, XII-1	
δ	**239,5**	**247**	**254,5**	**262**	**269,5**	**269,5**	**277**	**284,5**	**292**	**299,5**
PS	2554	2622	2646	2626	2563	2554	2622	2646	2626	2563
QS	-650,4	-321,4	36	249	679	-651	-322	13,3	348,4	678,2
IS	11,46	11,49	11,51	11,52	11,5	-11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
PR	2389	2458	2483	2465	2403	2390	2459	2485	2466	2404
QR	668,7	340	-17,4	-330,4	-660	666	338	2,5	-333	-663
IR	10,79	10,79	10,8	10,81	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8
PI	184,2	145,3	101,4	61,56	18,1	-20,4	23	66,8	107,1	146,3
QI	-280,7	-300,3	-315,5	-323,6	-327	335	332,6	324,5	311	292,2
II	2,93	2,91	2,89	2,87	2,86	2,87	2,87	2,86	2,86	2,86
PII	-185,4	-146,6	-102,8	-63	-19,6	13,2	-30	-72,7	-113,9	-152,9
QII	-279,2	-298,8	-314	-322,1	-325	336,9	334	326,3	312,6	294
III	3,01	3,01	3,01	3	3	2,95	2,95	2,94	2,94	2,93
PIII	299,1	275,2	244,7	214,3	178	182,5	143,7	102,6	60	16,6
QIII	-152,8	-189,2	-224,2	-251,1	-276	-281,4	-300,9	-315,2	-324,1	-327,3
IIII	2,92	2,91	2,9	2,9	2,89	2,95	2,93	2,92	2,91	2,9
PIV	-301,4	-277,5	-247,1	-216,7	-180	-185,7	-146,9	-105,8	-63,2	-19,8
QIV	-149,9	-186,3	-221,4	-248,3	-273	-279,8	-299,4	-313,8	-322,7	-325,9
IIV	3,06	3,07	3,08	3,09	3,09	3,08	3,08	3,09	3,09	3,09
UCI	121,9	108,5	93,71	80,4	66,9	221,4	224,6	226,7	228	228,2
ICI	1,89	1,71	1,52	1,34	1,15	3,22	3,27	3,31	3,33	3,34
ULI	231,5	230,7	228,7	226,1	222,4	53,7	67,9	81,9	95,5	108,7
ILI	3,36	3,35	3,32	3,28	3,22	0,78	0,98	1,19	1,39	1,58
UCII	8,39	9,45	24,6	38,3	52,9	225	220,5	215	208,6	201,3
ICII	0,52	0,54	0,65	0,78	0,95	3,3	3,2	3,1	3	2,9
ULII	196,4	203,3	209,6	214,3	218,4	64,9	50,4	35,6	20,8	6,6
ILII	2,85	2,95	3,04	3,12	3,17	0,94	0,73	0,52	0,3	0,09
UCIII	121,9	108,5	93,7	80,4	65,9	66,8	52,1	37,3	22,4	8,1
ICIII	1,62	1,47	1,3	1,16	1,01	1,09	0,96	0,84	0,74	0,68
ULIII	198,3	205,1	211,4	216,1	220,2	222,4	225,5	227,7	228,9	229,1
ILIII	1,62	1,47	1,3	1,16	1,01	1,09	0,96	0,84	0,74	0,68
UCIV	121,8	108,5	93,7	80,4	65,9	66,8	52,1	37,3	22,4	8,1
ICIV	1,74	1,61	1,47	1,35	1,22	1,16	1,04	0,93	0,84	0,82
ULIV	196,4	203,3	209,6	214,3	218,4	221,4	224,6	226,7	228	228,2

ILIV	2,47	2,55	2,63	2,7	2,74	2,78	2,82	2,85	2,86	2,87
U'S1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I'S1	6,05	6,03	6,01	6	6	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
U''S1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I''S1	6,54	6,53	6,52	6,5	6,47	6,1	6,1	6,1	6,1	6
U'S2	115,4	114,9	114,4	114	113,6	115,2	114,7	114,2	113,8	113,3
I'S2	12,27	12,18	12,08	12	11,9	12,8	12,7	12,6	12,5	12,5
U''S2	112,5	112,2	111,9	111,7	111,6	112,7	112,4	112,2	112	111,8
I''S2	12,9	12,85	12,78	12,7	12,6	12	12	11,9	11,8	11,7
U'R1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I'R1	4,83	4,81	4,8	4,8	4,8	6,03	6	6	6	6
U''R1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
I''R1	6,1	6,11	6,11	6,12	6,1	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
U'R2	117,5	117,3	117	116,7	116,4	118	117,7	117,3	116,9	116,5
I'R2	9,97	9,88	9,8	9,75	9,7	12,3	12,2	12,2	12,1	12,1
U''R2	117,4	117,1	116,7	116,3	115,9	116,9	116,7	116,4	116,1	115,7
I''R2	12,39	12,35	12,3	12,2	12,2	9,9	9,9	9,8	9,8	9,7
U1,3,5	114,2	113,9	113,6	113,3	113,1	114,3	113,9	113,7	113,4	113,1
U2,4,6	113,8	113,3	112,8	112,4	112,1	113,7	113,2	112,8	112,4	112
U7,9,11	117,8	117,5	117,2	116,8	116,4	117,5	117,2	116,8	116,8	116
U8,10,12	117,1	116,8	116,5	116,2	115,9	117,4	117,2	116,9	116,6	116,2
Ключи	I, II-1 III, IV-2 V,VI-2			VII, VIII-1 IX, X-2 XI, XII-1		I, II-1 II, IV-2 V, VI-1			II, VIII-1 IX, X-2 XI, XII-1	
δ	**299,5**	**307**	**314,5**	**322**	**329,5**	**329,5**	**337**	**344,5**	**352**	**359,5**
PS	2552	2620	2644	2624	2561	2554	2622	2646	2626	2563
QS	-650	-320,9	13,8	348,8	678,3	-654,8	-326	8,1	342,9	672,3
IS	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
PR	2391	2459	2484	2466	2403	2393	2462	2487	2468	2405
QR	664,6	335,7	0,71	-334,7	-664,8	658,4	329,7	5,2	-340,5	-670,5
IR	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,9
PI	149,9	186,3	219,3	248,3	272,9	280,6	300,2	314,6	323,6	326,9
QI	299	275,3	246,9	214,6	178,7	183,5	144,7	103,7	61,2	17,8
II	2,89	2,88	2,89	2,89	2,88	2,9	2,9	2,9	2,9	2,88
PII	-156,7	-193	-225,8	-254,7	-279	-286,2	-305,7	-319,9	-328,7	-331,9
QII	300,7	276,9	248,5	216,1	180,3	183,6	144,9	103,9	61,4	18,1
III	2,96	2,96	2,96	2,95	2,94	2,98	2,98	2,98	2,97	2,96
PIII	-18,4	24,98	67,7	108,9	148	152,4	188,7	221,6	250,5	275
QIII	336,3	333,9	325,8	312,2	293	300,6	276,8	248,5	216,1	180,3
IIII	2,87	2,86	2,86	2,85	2,8	2,87	2,86	2,85	2,84	2,84
PIV	15,1	-28,2	-70,8	-112,1	-151,2	-154,9	-191,2	-224,1	-253	-277
QIV	337,6	335,1	327	313,3	294	300,6	276,7	248,4	215,9	180
IIV	2,96	2,95	2,95	2,94	2,94	3	2,96	2,95	2,95	2,9
UCI	230,9	230,2	228,4	225,7	222	225,2	220,7	215,1	208,7	201
ICI	3,38	3,37	3,35	3,3	3,27	3,31	3,2	3,16	3,07	2,97
ULI	110,1	122,7	134,8	146,3	157,2	159,6	169,7	179	187,5	195,3
ILI	1,59	1,78	1,96	2,1	2,3	2,32	2,46	2,6	2,7	2,8
UCII	203,7	195,6	186,7	177	166,6	168,5	157,5	145,8	133,4	120,6
ICII	3	2,84	2,72	2,6	2,4	2,45	2,3	2,13	1,96	1,8
ULII	7,3	10,9	24,9	39,5	54	55,6	69,5	83,3	96,7	109,8
ILII	0,11	0,16	0,36	0,57	0,78	0,81	1,01	1,2	1,4	1,6
UCIII	230,9	230,2	228,4	225,7	222	225,2	220,7	215	208,7	201,3
ICIII	2,91	2,9	2,88	2,85	2,8	2,84	2,78	2,7	2,63	2,5
ULIII	7,3	10,9	24,9	39,5	54	55,6	69,6	83,3	96,7	109,8
ILIII	2,91	2,9	2,88	2,85	2,8	2,84	2,8	2,7	2,6	2,5

UCIV	231,8	231	229,3	226,6	222,8	225	220,5	215	208,5	201
ICIV	2,93	2,92	2,9	2,87	2,82	2,8	2,8	2,7	2,64	2,5
ULIV	7,3	10,9	24,9	39,5	54	55,6	69,5	83,3	96,7	109,8
ILIV	0,09	0,14	0,3	0,49	0,68	0,7	0,87	1,05	1,22	1,4
U'S1	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

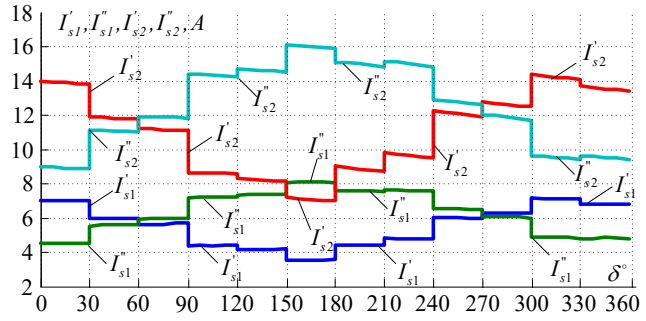


Рис.П8.1 Токи обмоток трансформатора передающего узла S

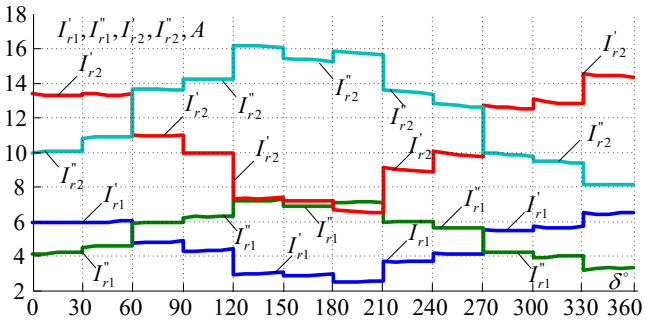


Рис. П8.2 Токи обмоток трансформатора приемного узла R

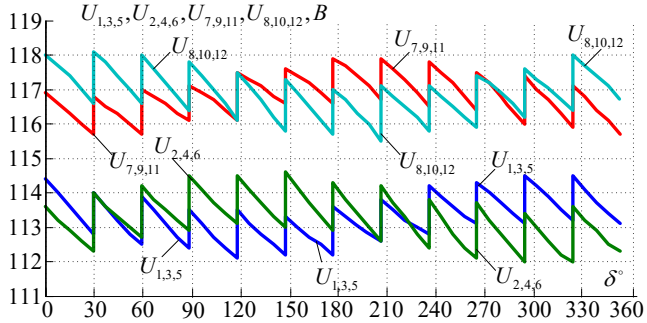


Рис.П8.3 Напряжения в узлах на стороне НН

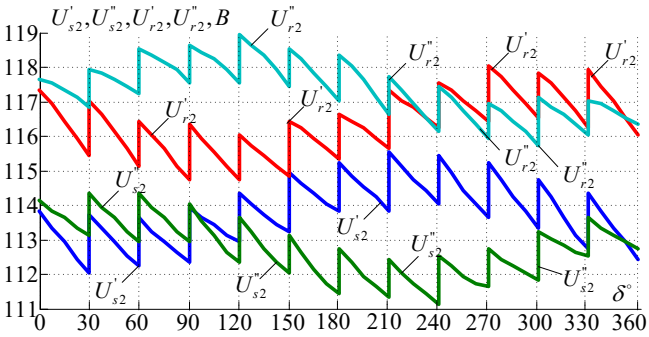


Рис. П8.4 Напряжения обмоток на стороне НН

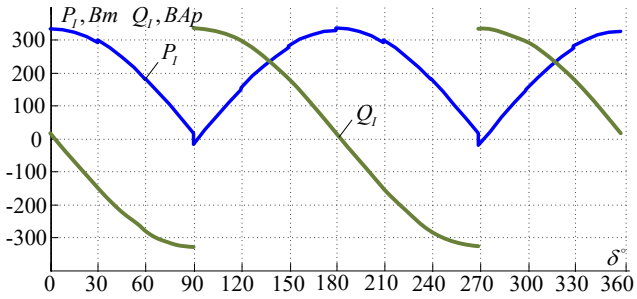


Рис.П8.5 Активная и реактивная мощность элементов первого рода передающего узла

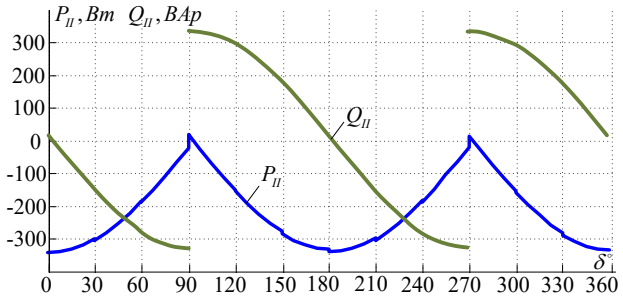


Рис. П8.6 Активная и реактивная мощность элементов первого рода приемного узла

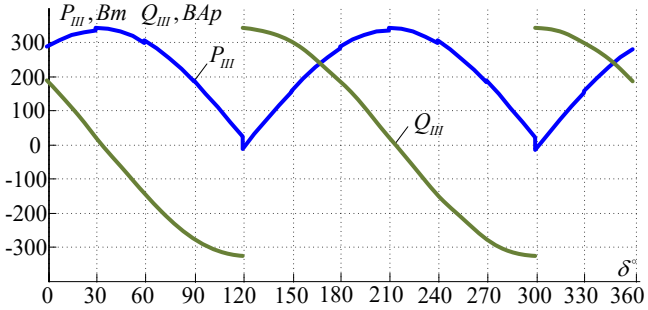


Рис.П8.7 Активная и реактивная мощность элементов второго рода передающего узла

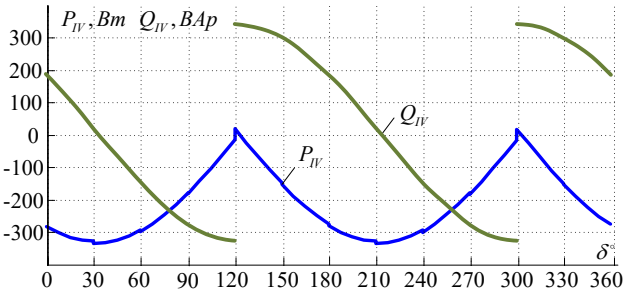


Рис.П8.8 Активная и реактивная мощность элементов второго рода приемного узла

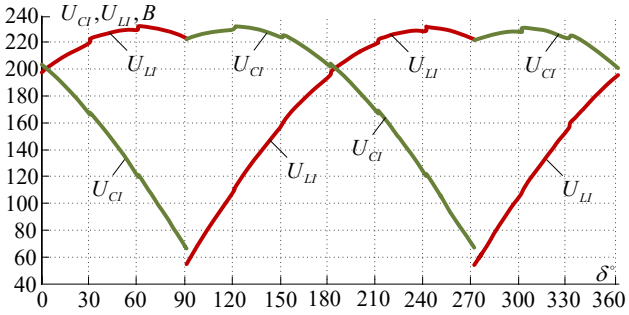


Рис.П8.9 Напряжения преобразовательных элементов первого рода передающего узла

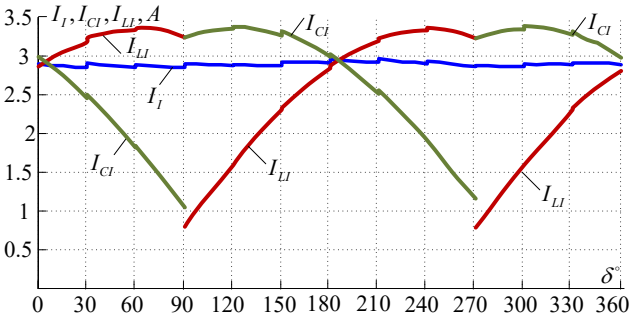


Рис.П8.10 Токи преобразовательных элементов первого рода передающего узла

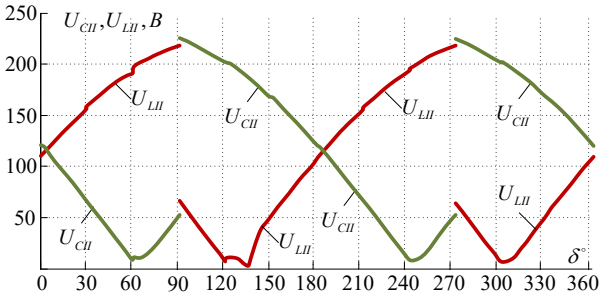


Рис.П8.11 Напряжения преобразовательных элементов первого рода приемного узла

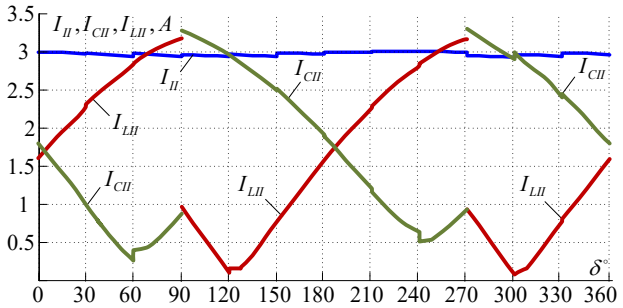


Рис.П8.12 Токи преобразовательных элементов первого рода приемного узла

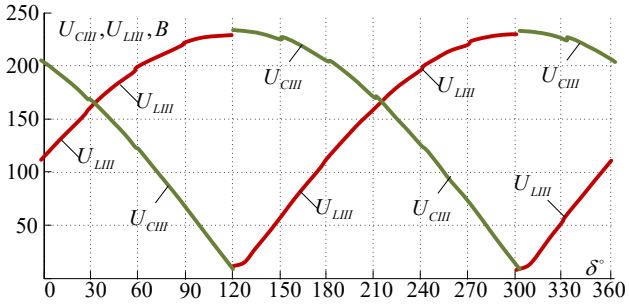


Рис.П8.13 Напряжения преобразовательных элементов второго рода передающего узла

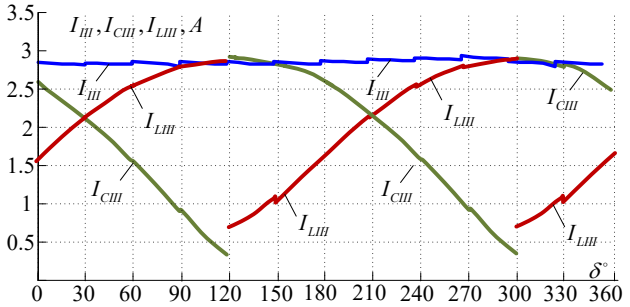


Рис.П8.14 Токи преобразовательных элементов второго рода передающего узла

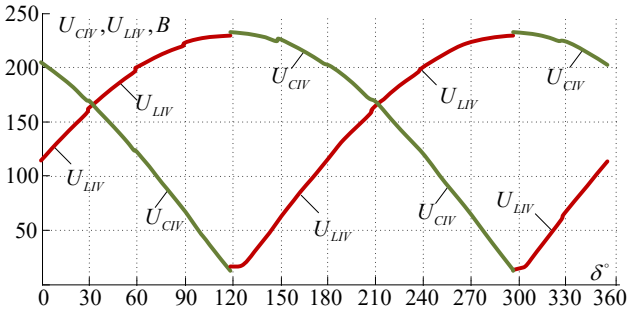


Рис.П8.15 Напряжения преобразовательных элементов второго рода приемного узла

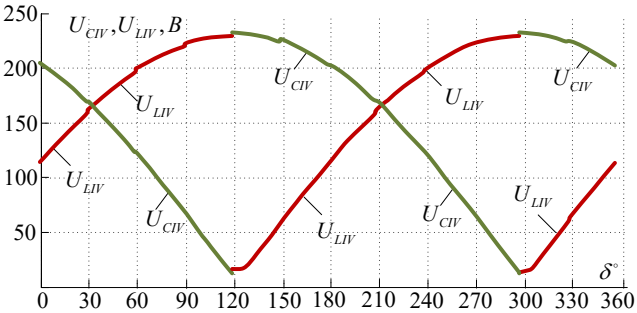


Рис.П8.16 Токи преобразовательных элементов второго рода приемного узла

Модуль		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		IX		X		XI		XII	
Диапазон δ°		277.5° ÷ 97.5°	97.5° ÷ 277.5°	262.5° ÷ 82.5°	82.5° ÷ 262.5°	247.5° ÷ 67.5°	67.5° ÷ 247.5°	232.5° ÷ 52.5°	52.5° ÷ 232.5°	217.5° ÷ 37.5°	37.5° ÷ 217.5°	202.5° ÷ 22.5°	22.5° ÷ 202.5°	187.5° ÷ 7.5°	7.5° ÷ 187.5°	172.5° ÷ 352.5°	352.5° ÷ 172.5°	157.5° ÷ 337.5°	337.5° ÷ 157.5°	142.5° ÷ 322.5°	322.5° ÷ 142.5°	127.5° ÷ 307.5°	307.5° ÷ 127.5°	112.5° ÷ 292.5°	292.5° ÷ 112.5°
Ключи	1	●		●		●		●		●		●		●		●		●		●		●		●	
	2		●		●		●		●		●		●		●		●		●		●		●		●

Рис.П8.17Диаграмма переключения каждого из трехфазных блоков

ПРИЛОЖЕНИЕ 9.
Результаты расчетных экспериментов при имитационном моделировании работы преобразователя частоты по схеме «зигзаг»

Таблица П9.1Работа на активную нагрузку

Кол-во поз.	*∂Ps*	*THD(Is)*	*∂Pr*	*THD(Ir)*
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

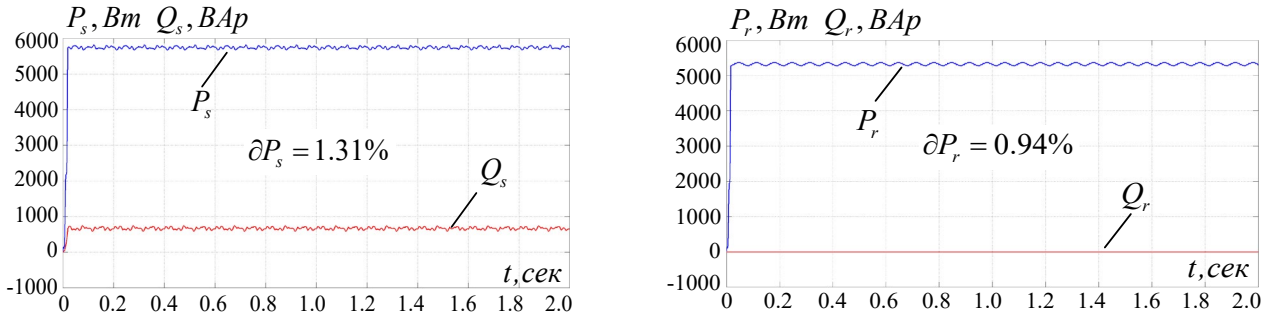


Рис.П9.1а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку. 24–х позиционное регулирование.

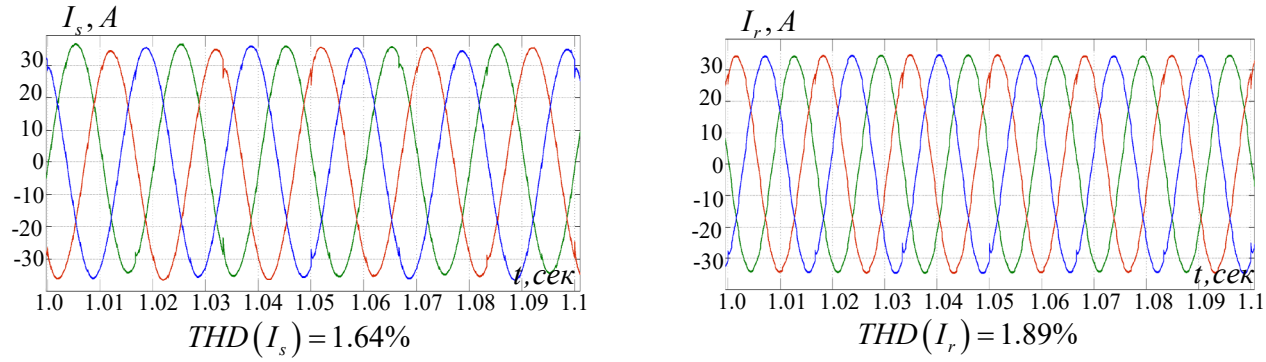


Рис.П9.1б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку. 24–х позиционное регулирование.

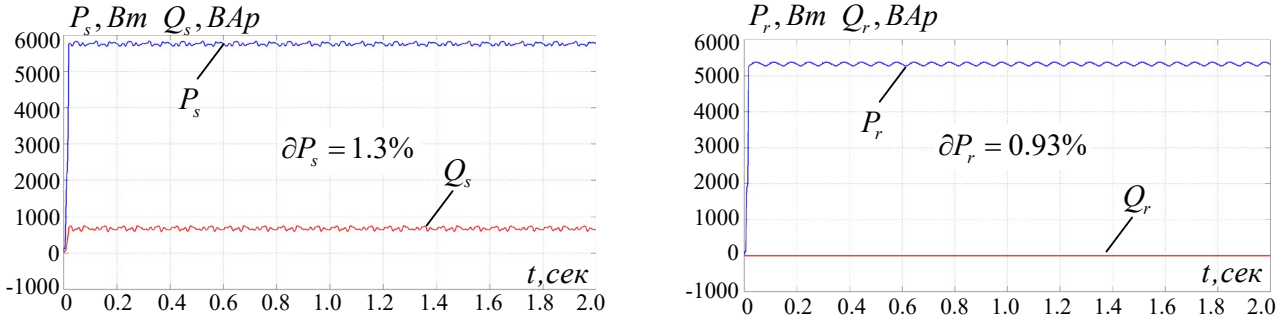
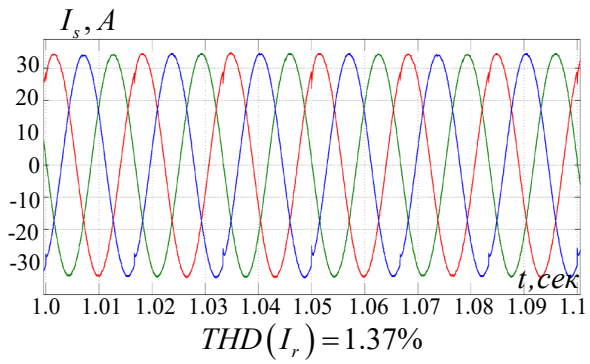


Рис.П9.2а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку. 48–и позиционное регулирование.



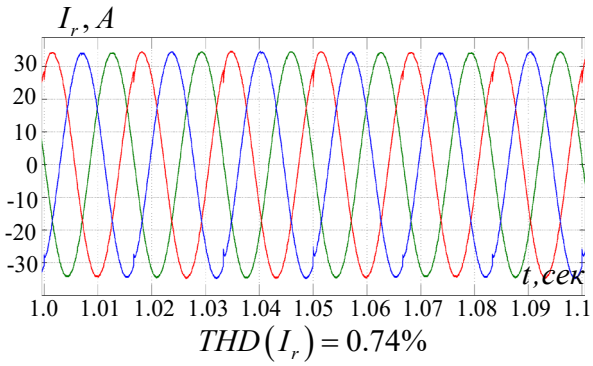
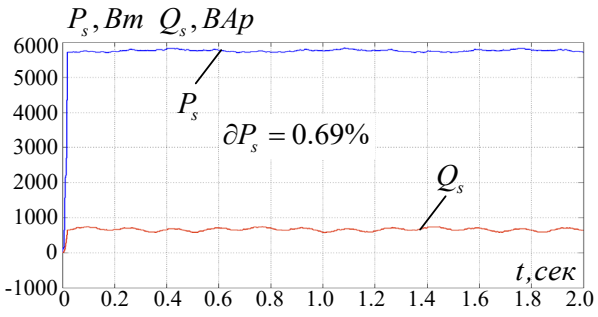


Рис.П9.2б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку. 48–и позиционное регулирование.



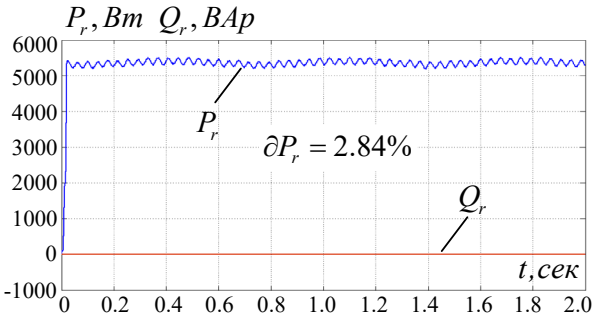
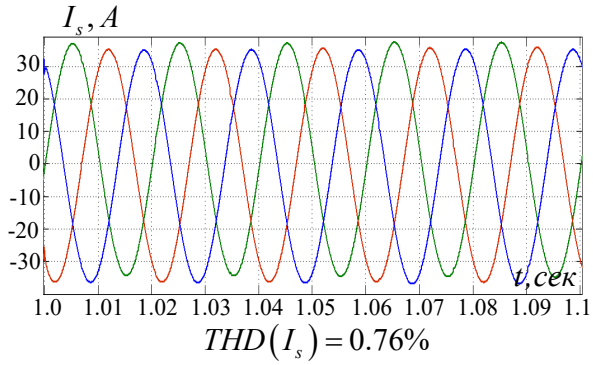


Рис.П9.3а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку. 24–х позиционное регулирование.



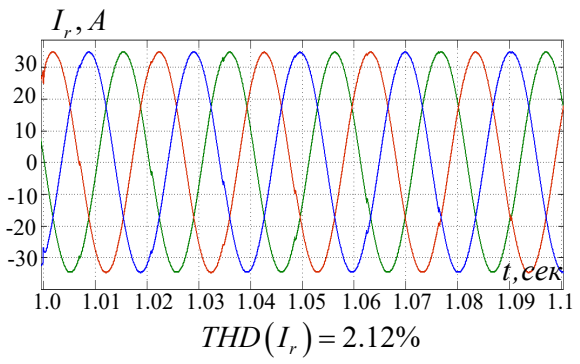
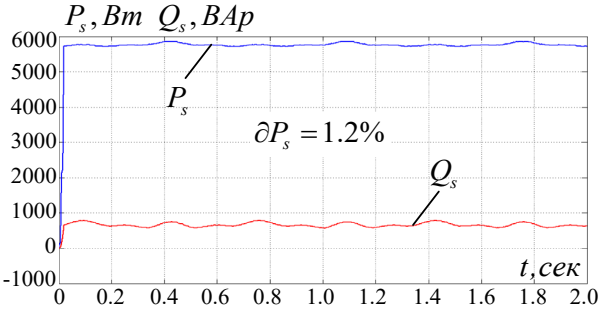


Рис.П9.3б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку. 24–х позиционное регулирование.



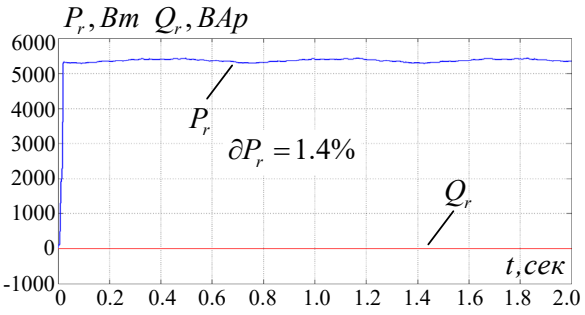
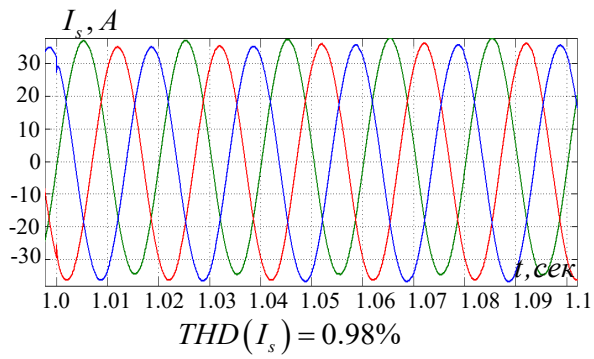


Рис.П9.4а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку. 48–и позиционное регулирование.



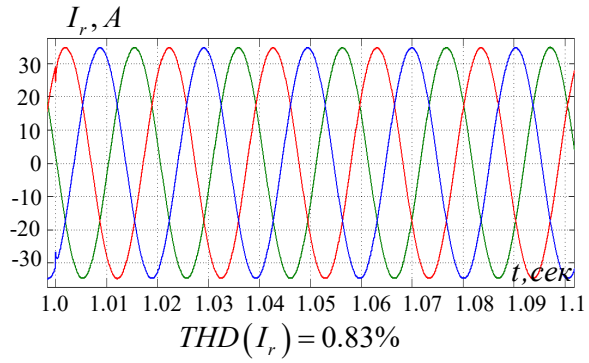
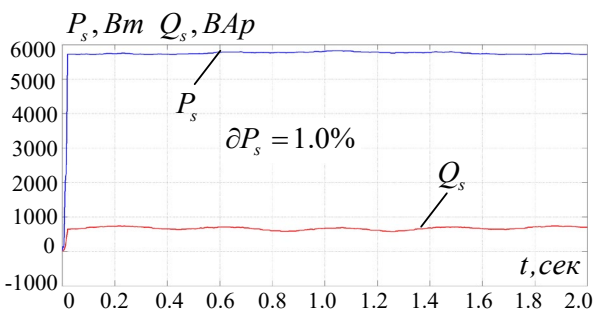


Рис.П9.4б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку. 48–и позиционное регулирование.



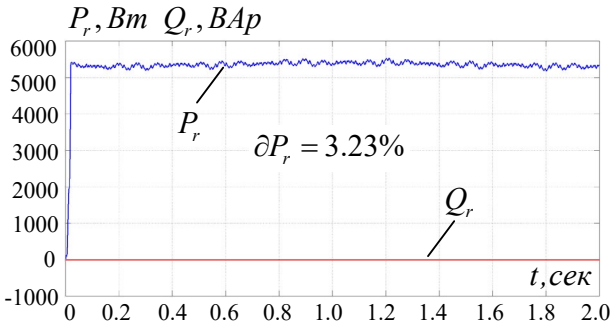
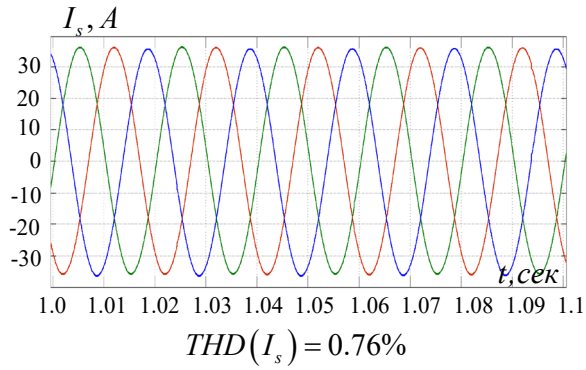


Рис.П9.5а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку. 24–х позиционное регулирование.



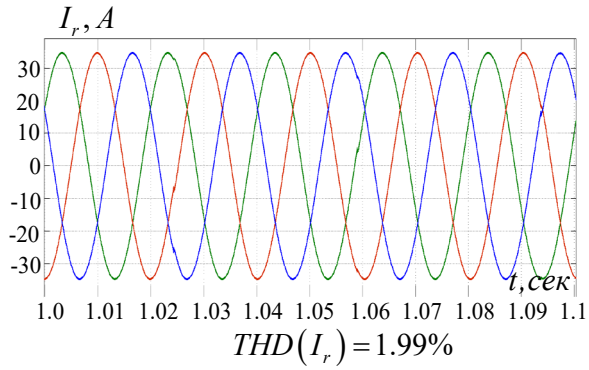
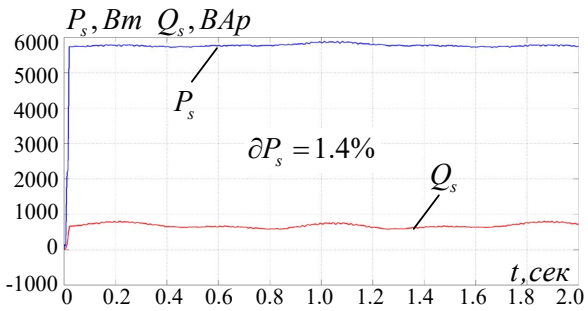


Рис. П9.5 Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку. 24–х позиционное регулирование.



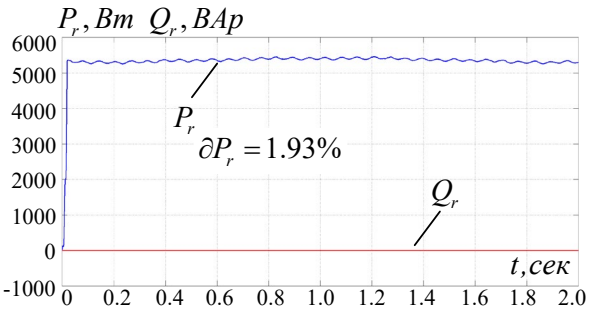


Рис.П9.6а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку. 48–и позиционное регулирование.

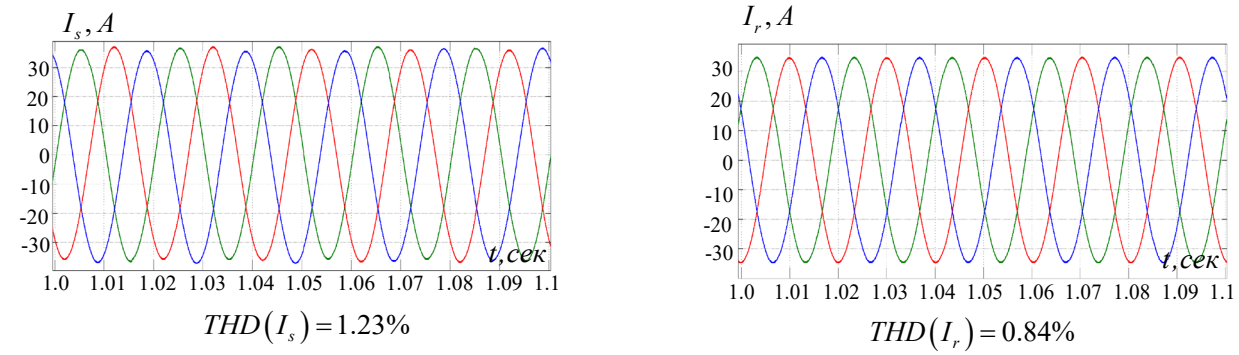


Рис. П9.6б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку. 48–и позиционное регулирование.

Таблица П9.2. Работа на активную нагрузку через ЛЭП

Кол-во поз.	*ðPs*	*THD(Is)*	*ðPr*	*THD(Ir)*
60-50Гц, Rn=18/2+1.3Ом				
24	0.57	3.28	1.03	1.27
48	0.83	1.29	1.07	0.9
50-60Гц, Rn=18/2+2 Ом				
24	0.91	3.53	0.85	1.31
48	0.77	2.19	0.85	0.87
50-49 Гц, Rn=18/2+1.3 Ом				
24	0.92	1.75	2.39	2.27
48	0.76	1.21	0.91	0.85

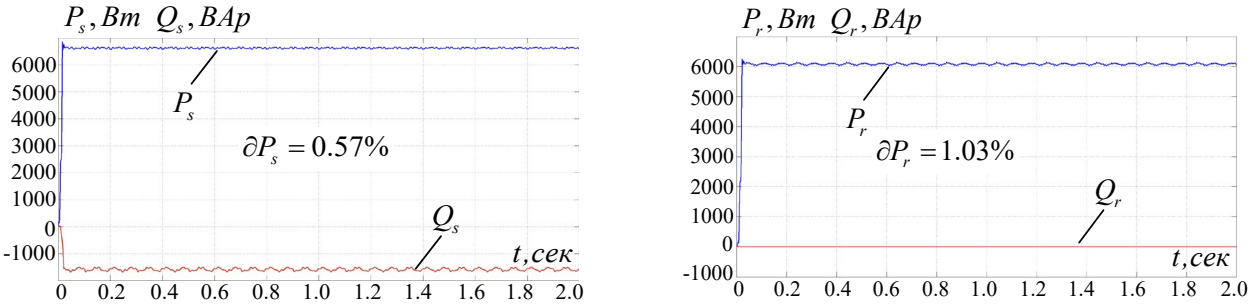


Рис.П9.7а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 60/50Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24–х позиционное регулирование.

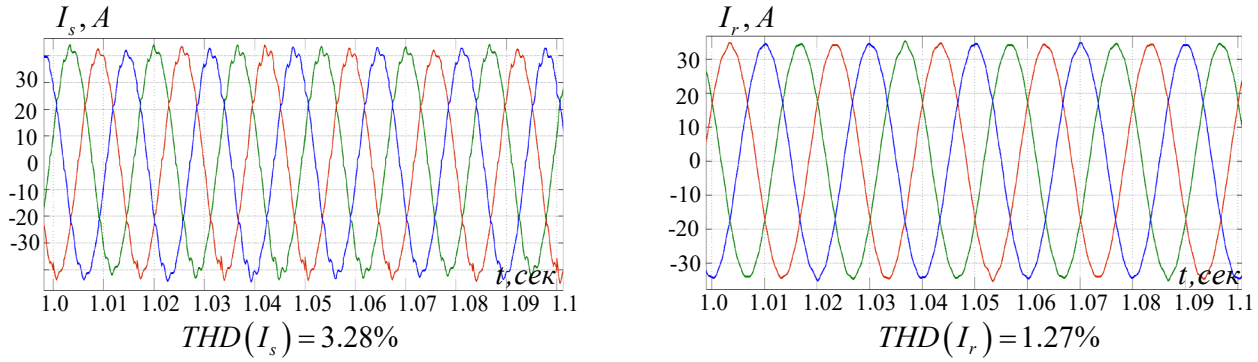
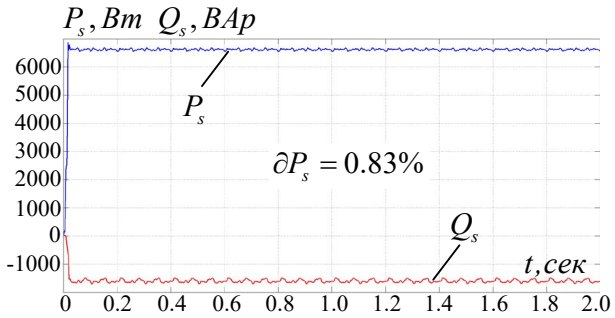


Рис.П9.7б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 60/50Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24–х позиционное регулирование.



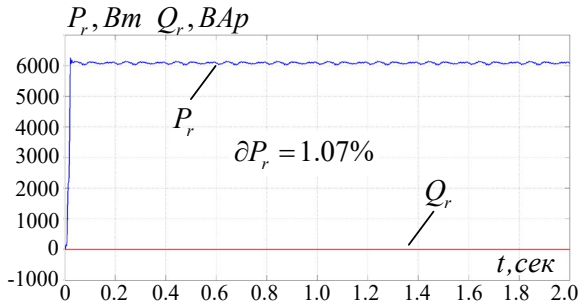
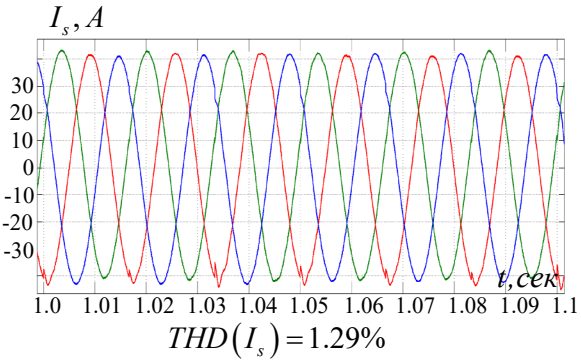


Рис.П9.8а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 60/50Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48–и позиционное регулирование.



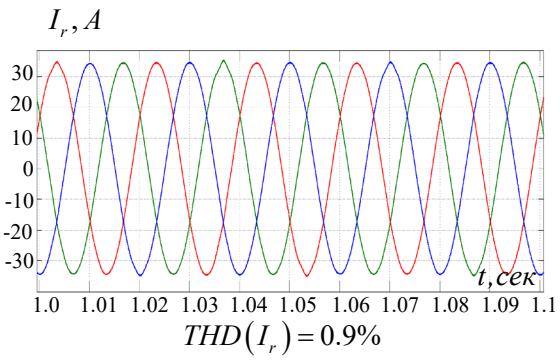
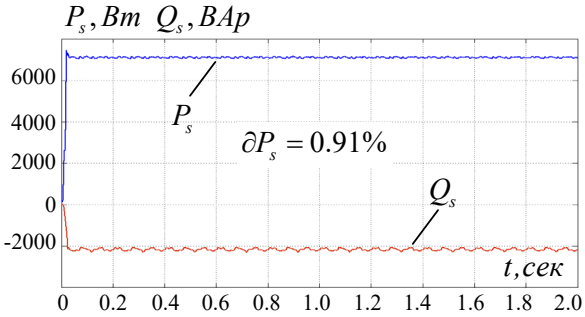


Рис.П9.8б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 60/50Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48–и позиционное регулирование.



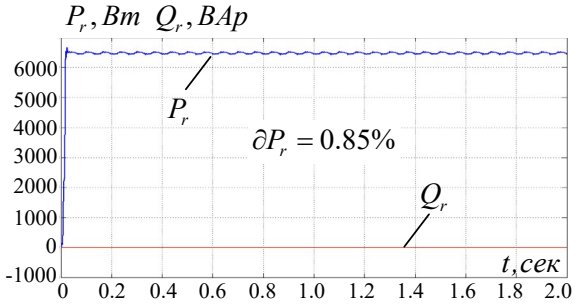
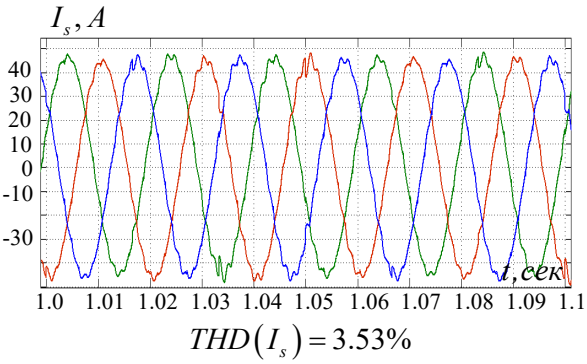


Рис.П9.9а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24–х позиционное регулирование.



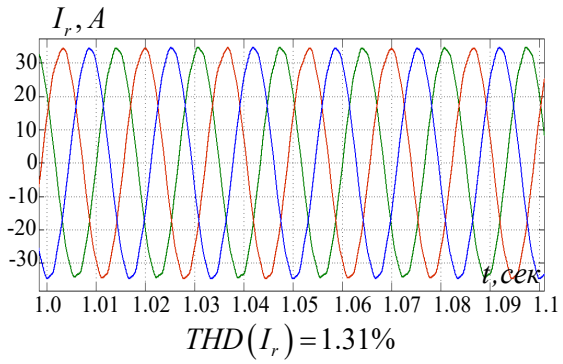
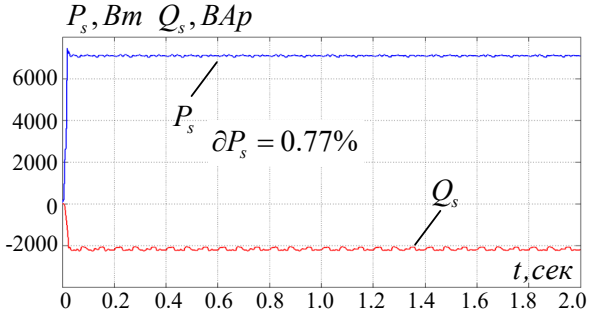


Рис. П9.9б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24–х позиционное регулирование.



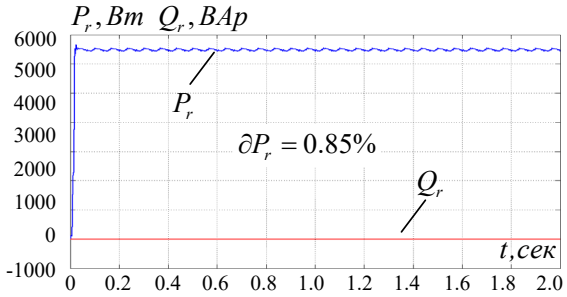
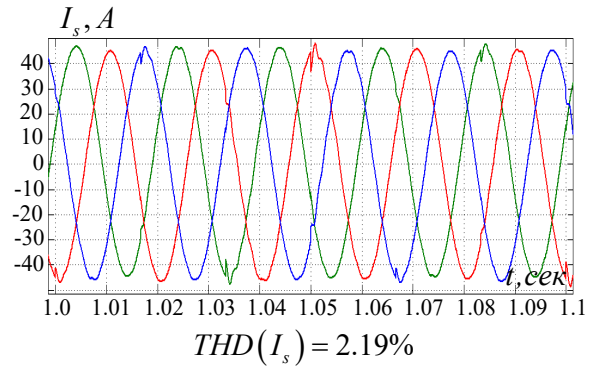


Рис.П9.10а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48–и позиционное регулирование.



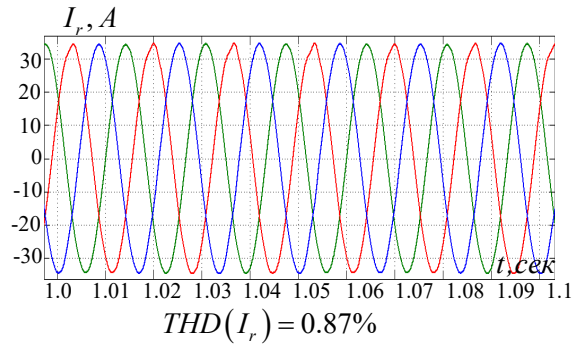
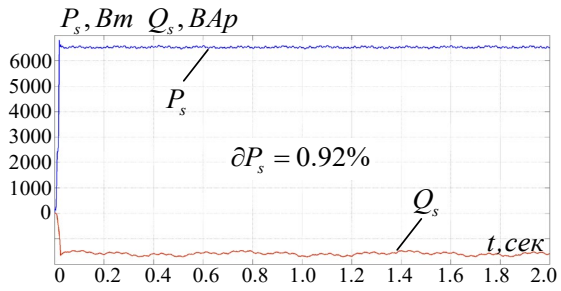


Рис.П9.10б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/60Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48–и позиционное регулирование.



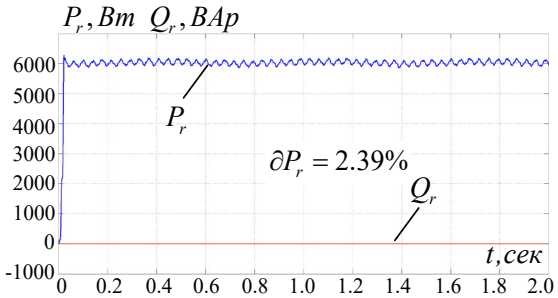
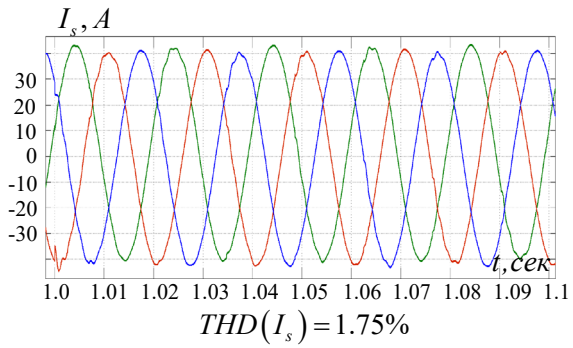


Рис.П9.11а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24–х позиционное регулирование.



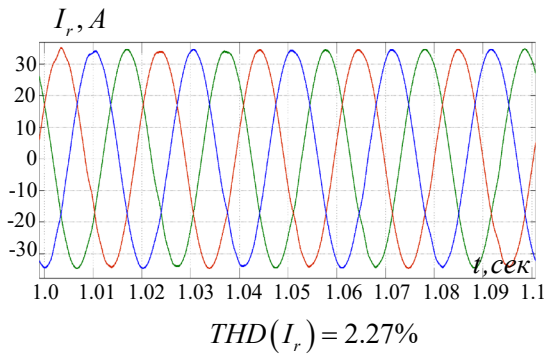
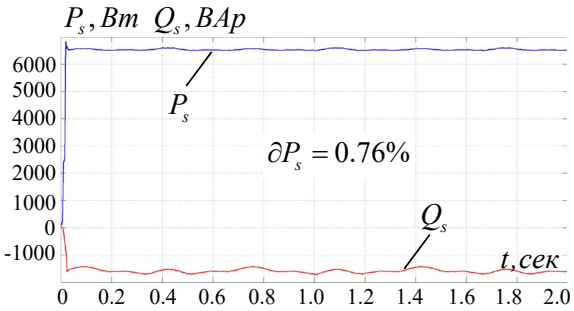


Рис.П9.11б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24–х позиционное регулирование.



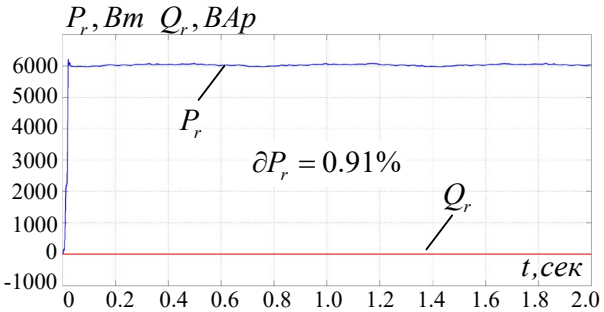
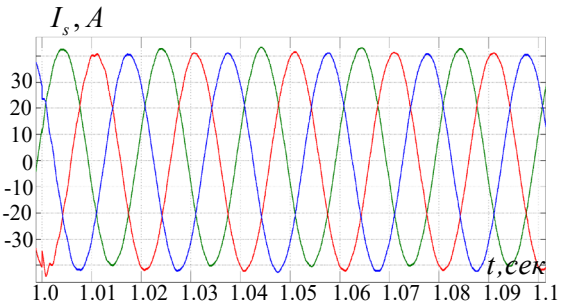


Рис.П9.12а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48–и позиционное регулирование.



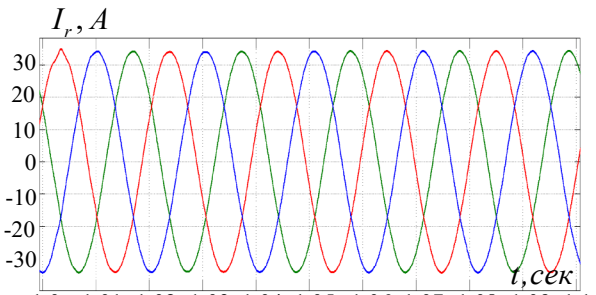
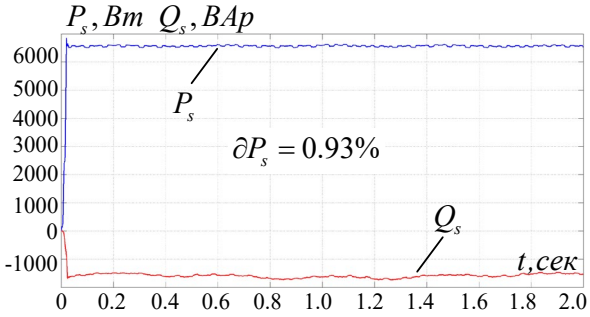


Рис.П9.12б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48–и позиционное регулирование.



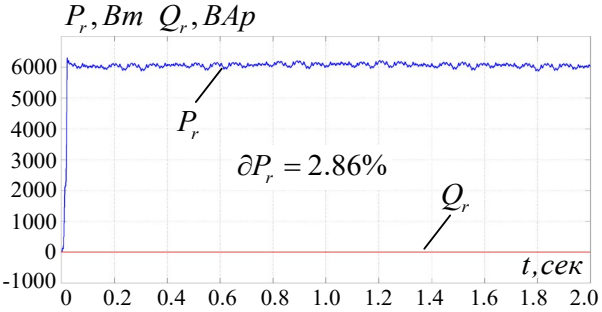
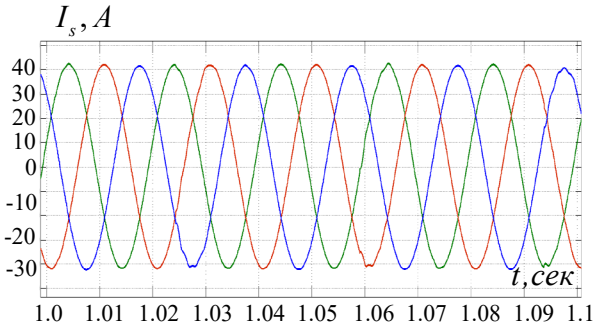


Рис.П9.13а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24–х позиционное регулирование.



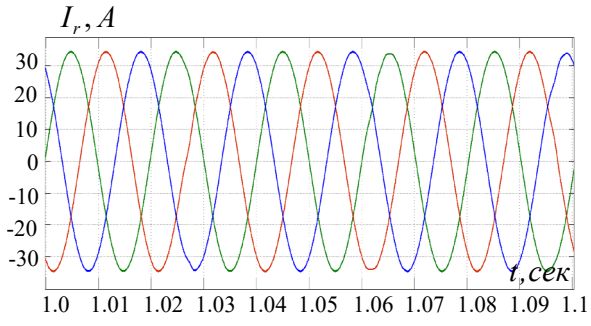


Рис.П9.13б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 24–х позиционное регулирование.

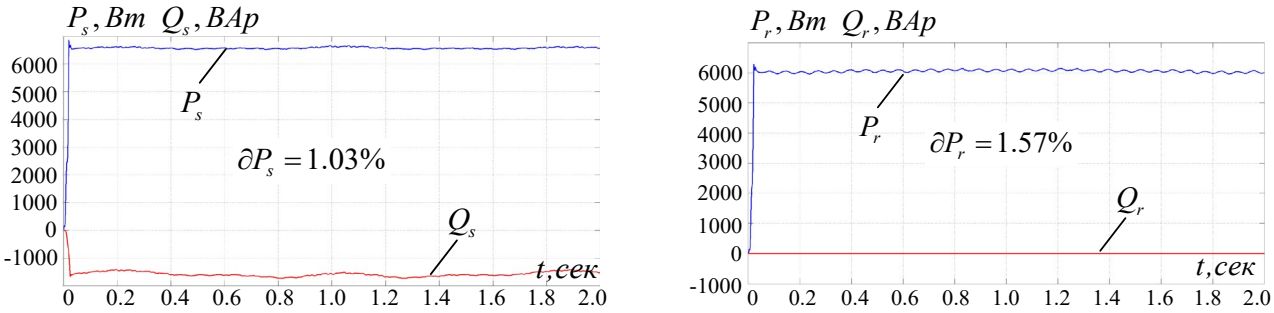
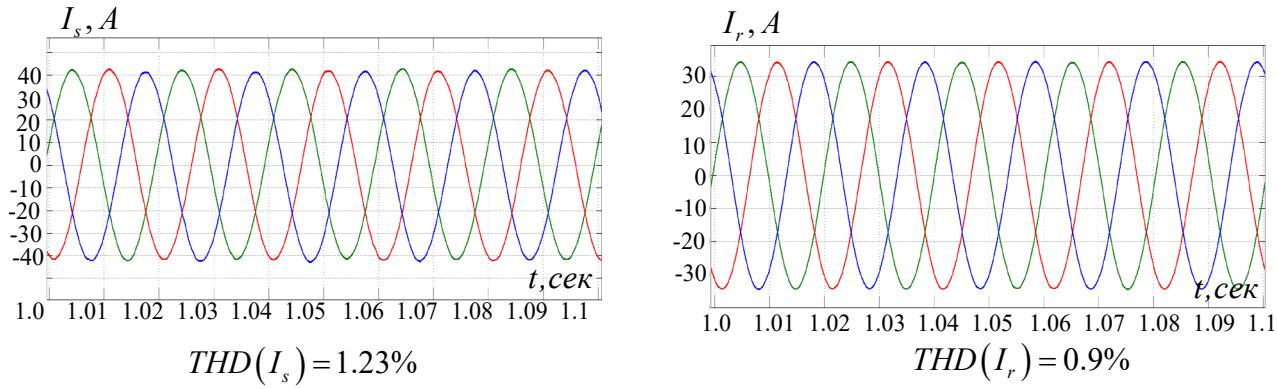


Рис.П9.14а Мощности на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48–и позиционное регулирование.



$THD(I_s) = 1.23\%$ $THD(I_r) = 0.9\%$

Рис.П9.14б Токи на передающей и приемной системах. Преобразование 50/49,6Гц. Работа на активную нагрузку через ЛЭП. 48–и позиционное регулирование.

Таблица П9.3 Работа на приемную систему с мощностями S и R через линию (обе системы одинаковой мощности)

Кол-во поз.	*∂Ps*	*THD(Is)*	*THD(Us)*	*∂Pr*	*THD(Ir)*
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 П9.4 Согласование работы передающей 60Гц и приемной 50Гц систем через ЛЭП 30° при различных соотношениях мощностей объединяемых энергосистем.

Кол-во поз.	*∂Ps*	*THD(Is)*	*THD(Us)*	*∂Pr*	*THD(Ir)*	*δsr*
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°
Кол-во поз.	*∂Ps*	*THD(Is)*	*THD(Us)*	*∂Pr*	*THD(Ir)*	*δsr*
Мощность передающей и приемной системы 10:1						
24	2.02	4.51	2.37	2.97	-	-30.5°

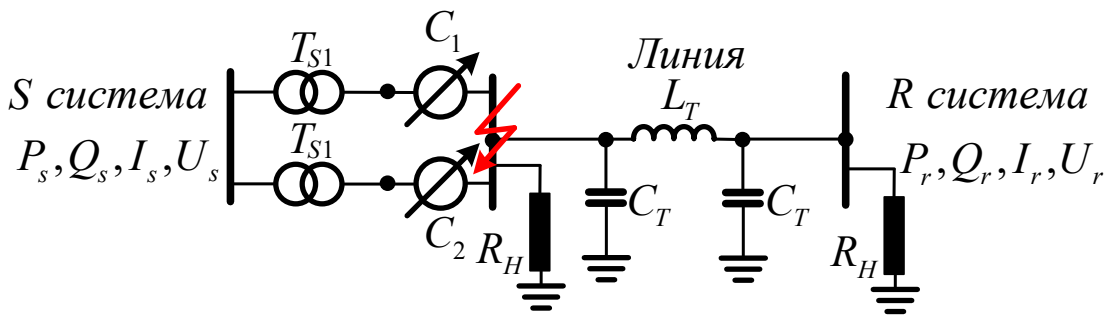
48	2.19	1.82	2.28	1.72	-	-31°
Мощность передающей и приемной системы 100:1						
24	1.89	4.76	2.5	3.84	0.9	-32°
48	2.09	1.8	2.26	1.89	0.22	-32°
Мощность передающей и приемной системы 1000:1						
24	1.55	3.62	1.77	1.8	2.15	-40°
48	1.63	2.26	1.77	1.67	1.38	-40.5°

Таблица П9.5 Согласование работы передающей 50Гц и приемной 60Гц систем через ЛЭП 30° при различных соотношениях мощностей объединяемых энергосистем.

Кол-во поз.	*ðPs*	*THD(Is)*	*THD(Us)*	*ðPr*	*THD(Ir)*	*δsr*
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 П9.6 Согласование работы передающей 50Гц и приемной 49Гц систем через ЛЭП 30° при различных соотношениях мощностей объединяемых энергосистем.

Кол-во поз.	*ðPs*	*THD(Is)*	*THD(Us)*	*ðPr*	*THD(Ir)*	*δsr*
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.П9.15 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах со стороны приемной системы

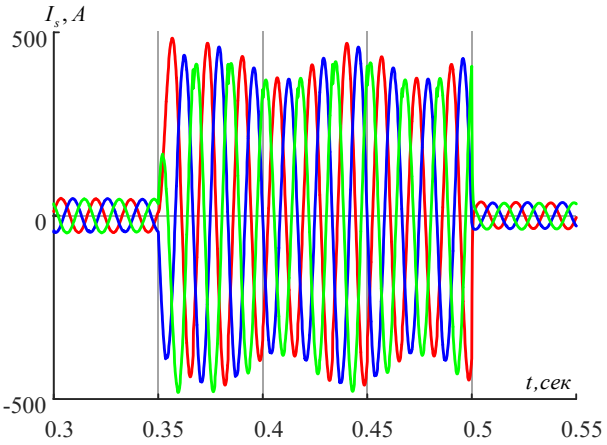


Рис.П9.16 Ток на передающей системе в момент возникновения короткого замыкания

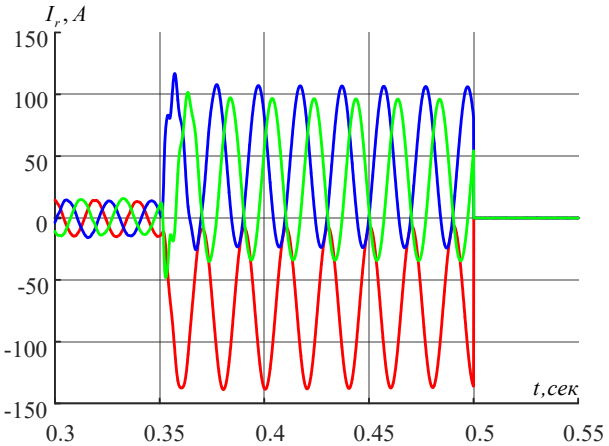


Рис. П9.17 Ток на приемной системе в момент возникновения короткого замыкания

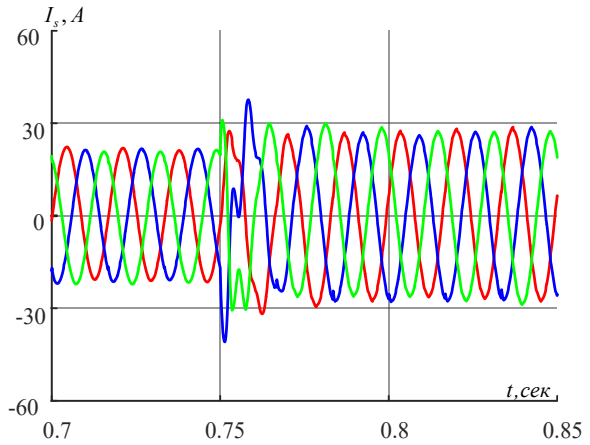


Рис.П9.18 Ток на передающей системе в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

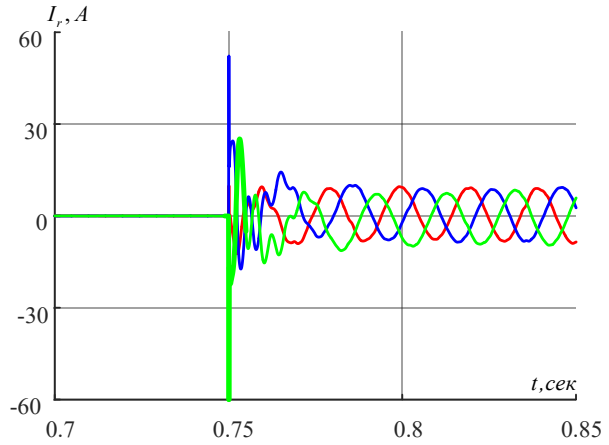


Рис.П9.19 Ток на приемной системе в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

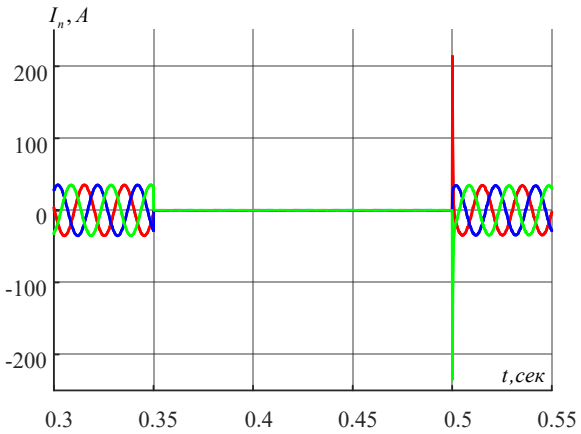


Рис.П9.20 Токи на нагрузке в момент возникновения короткого замыкания

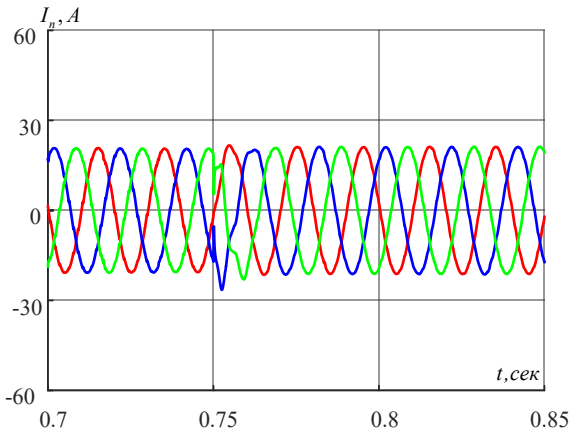


Рис.П9.21 Токи на нагрузке в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

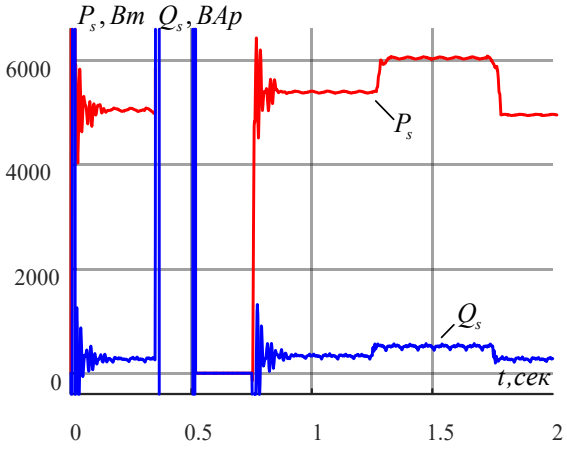


Рис.П9.22 Мощности на передающей системе

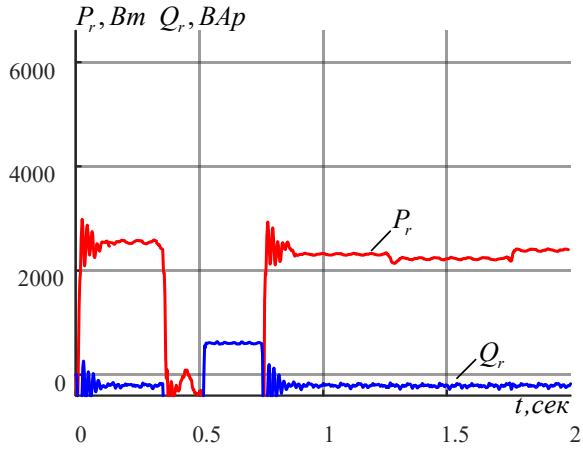
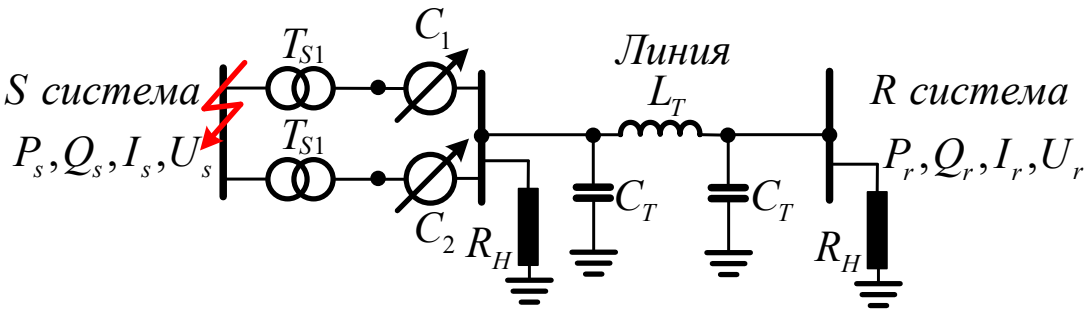


Рис.П9.23 Мощности на приемной системе



-

РисП9.24 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах со стороны приемной системы

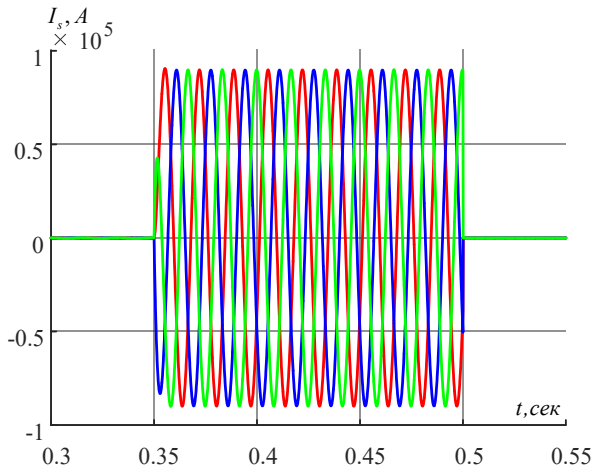


Рис.П9.25 Ток на передающей системе в момент возникновения короткого замыкания

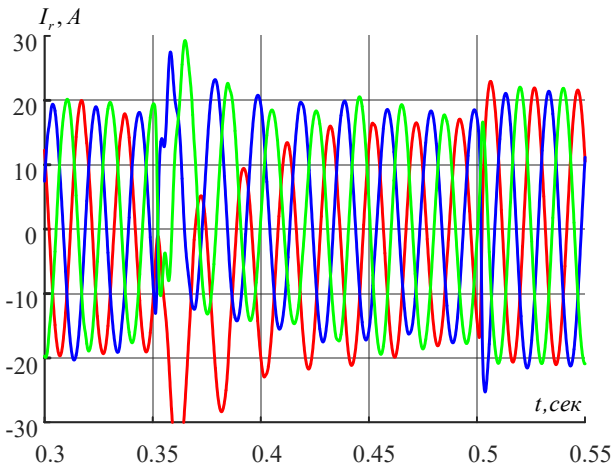


Рис.П9.2 Ток на приемной системе в момент возникновения короткого замыкания

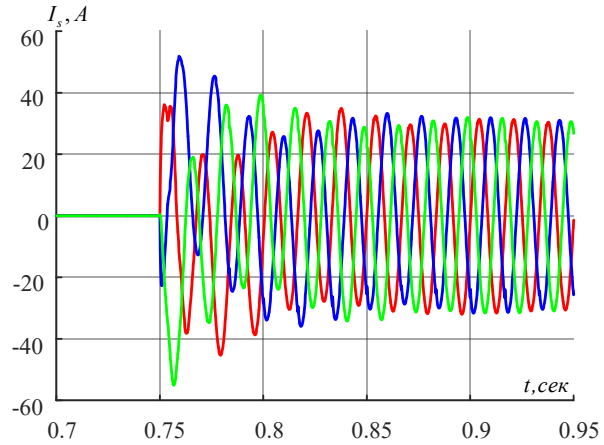


Рис.П9.2 Ток на передающей системе в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

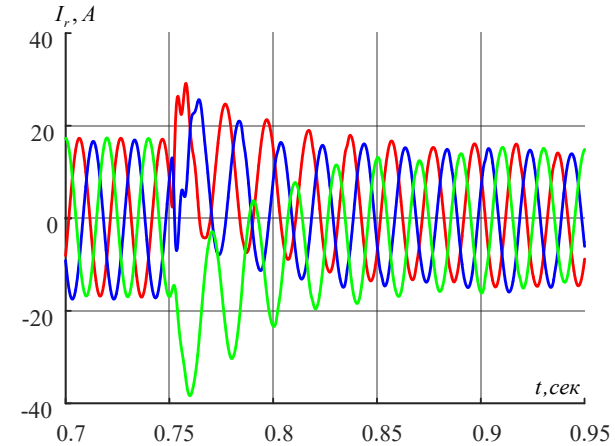


Рис.П9.28 Ток на приемной системе в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

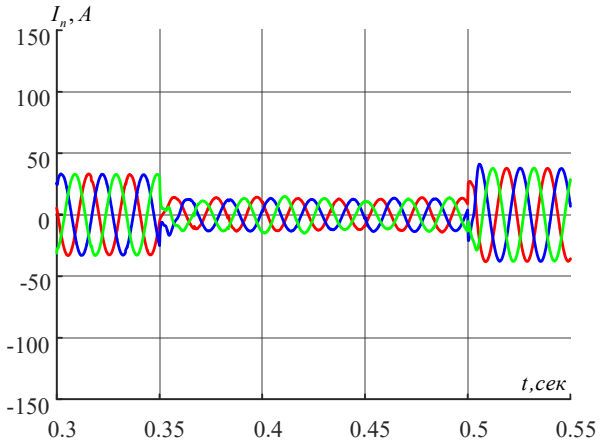


Рис.П9.29 Токи на нагрузке в момент возникновения короткого замыкания

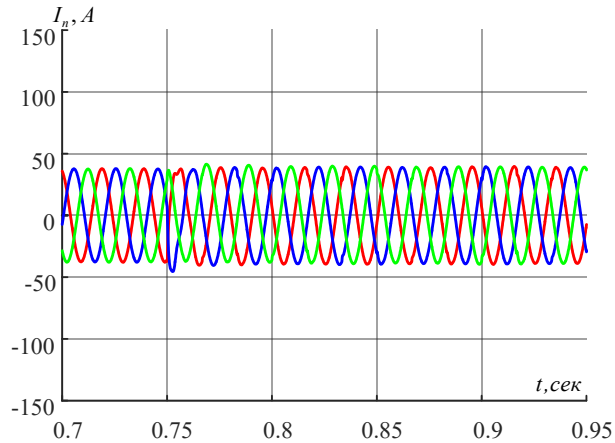


Рис.П9.30 Токи на нагрузке в момент восстановления асинхронной межсистемной связи

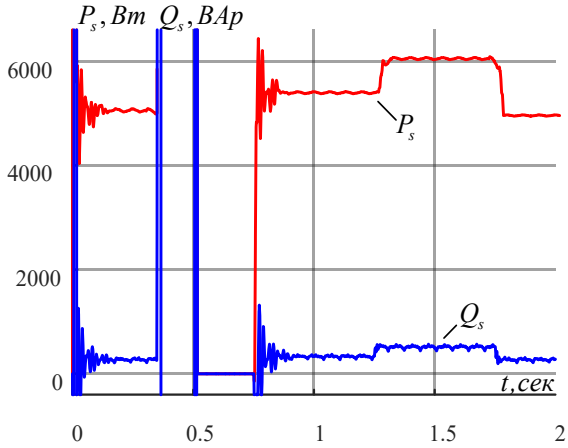


Рис.П9.31 Мощности на передающей системе

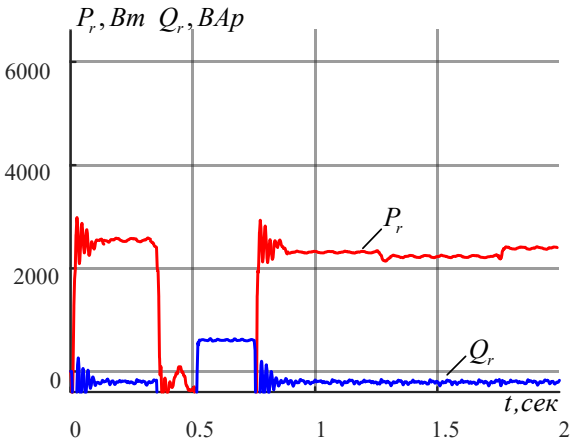


Рис.П9.32 Мощности на приемной системе

ПРИЛОЖЕНИЕ 10.
Результаты экспериментов при работе преобразователя частоты по схеме «шестиугольник»

Режим 100% уровня передаваемой мощности при двухканальном режиме работы устройства

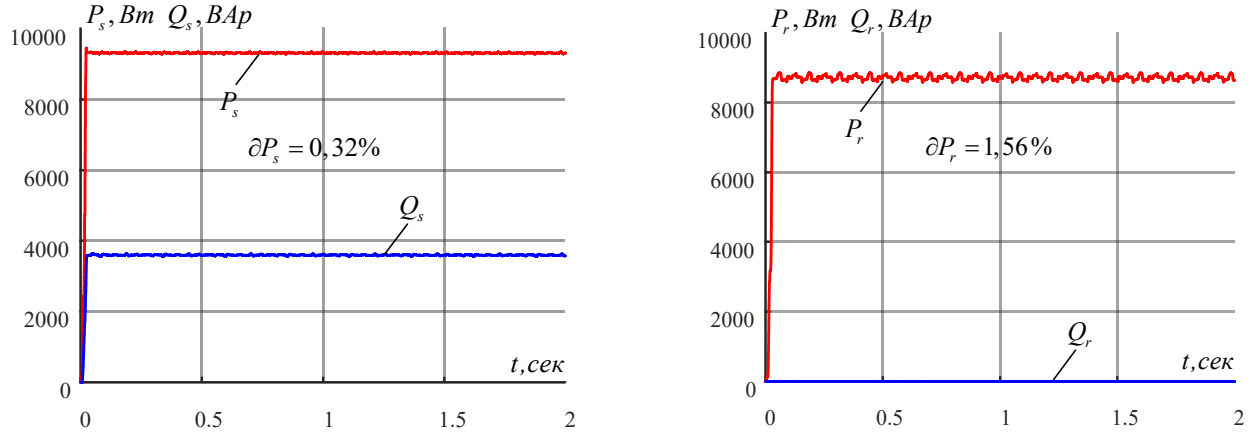


Рис.П10.1 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании

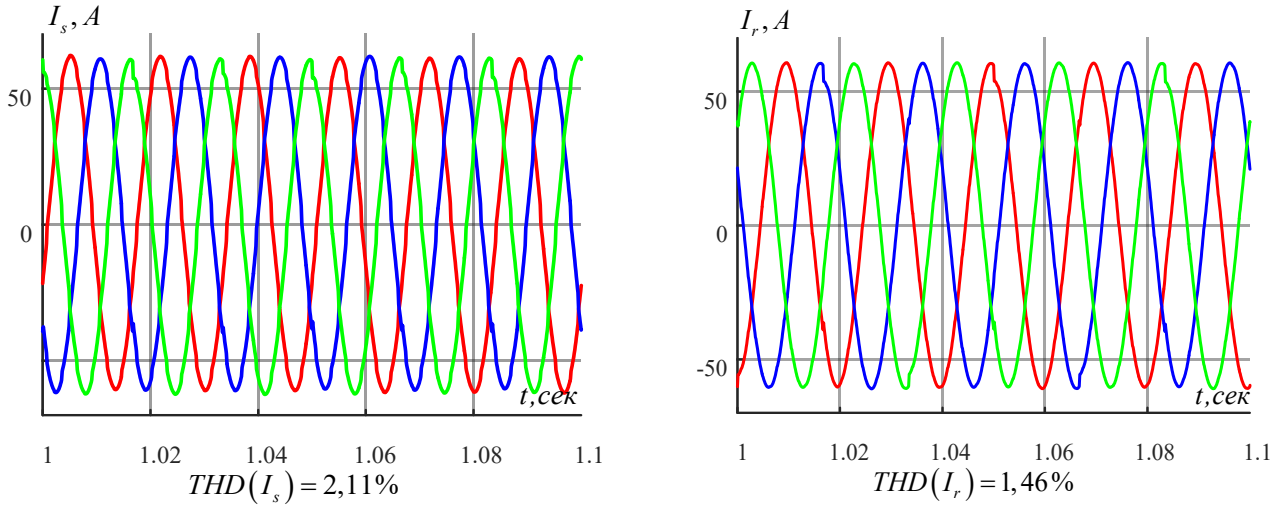


Рис.П10.2 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании

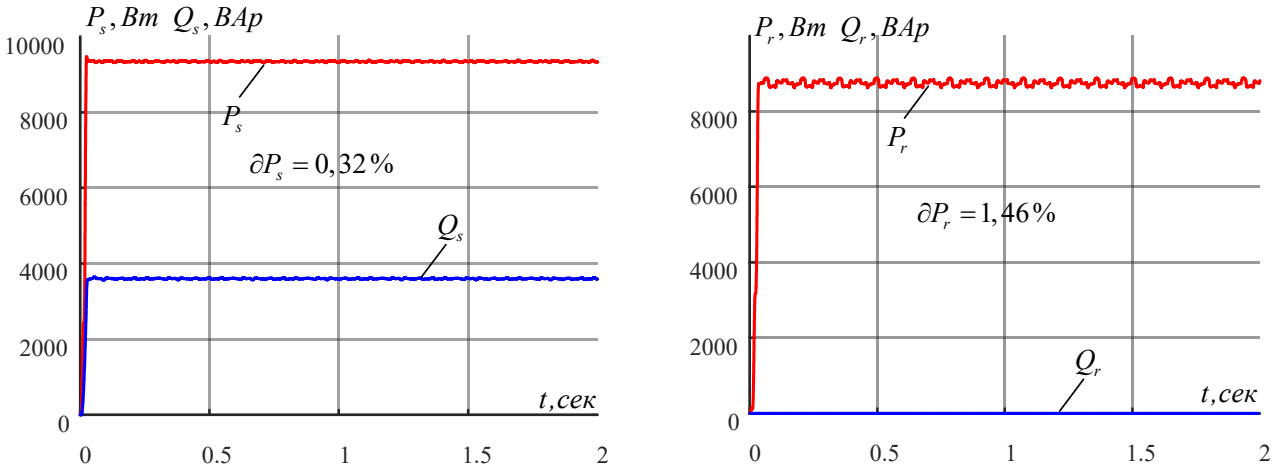


Рис.П10.3 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

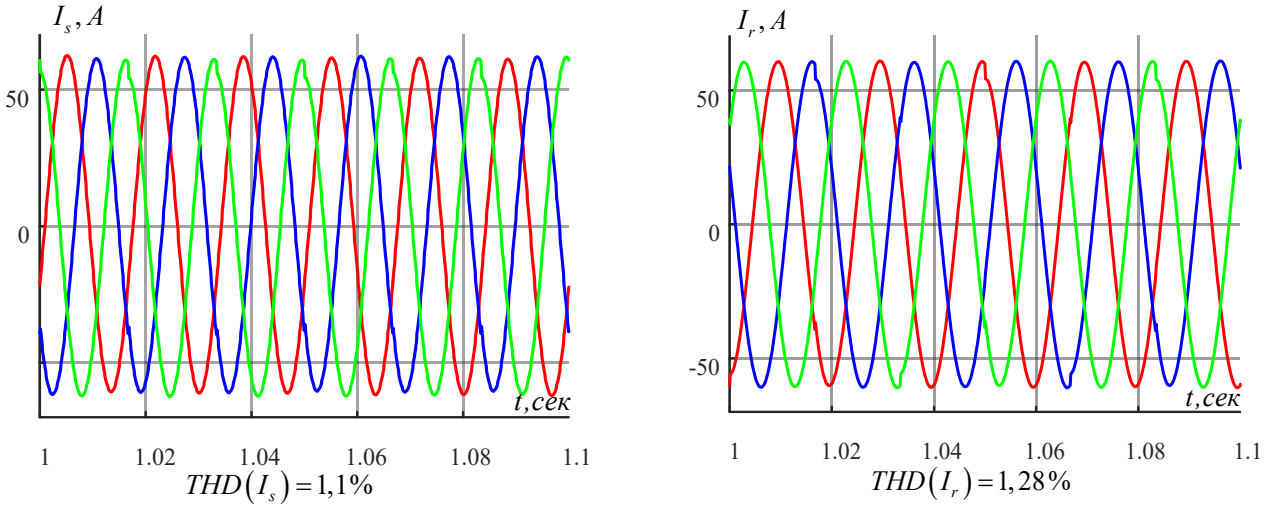


Рис.П10.4 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

Режим 65% уровня передаваемой мощности при двухканальном режиме работы устройства

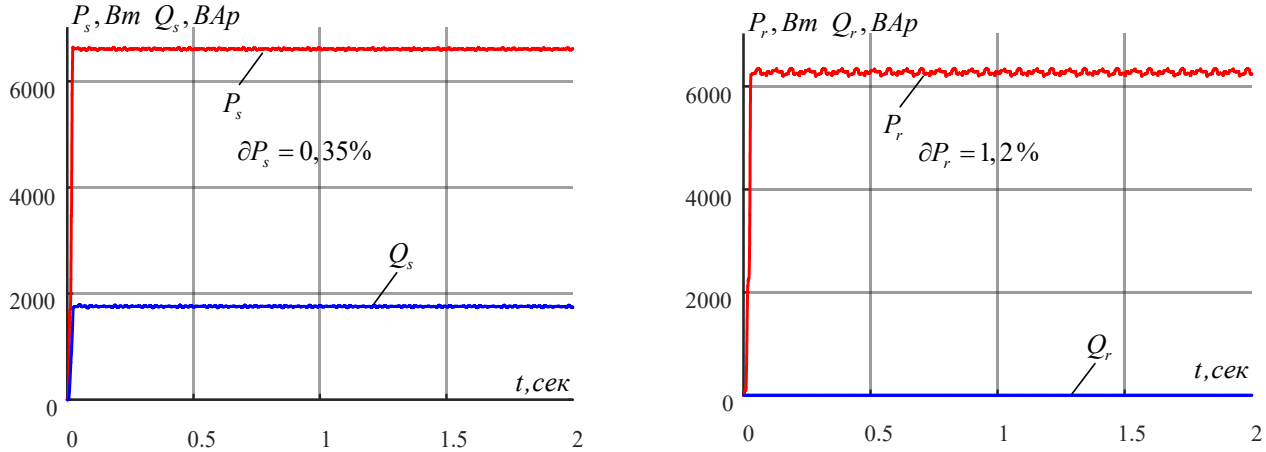


Рис.П10.5 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании

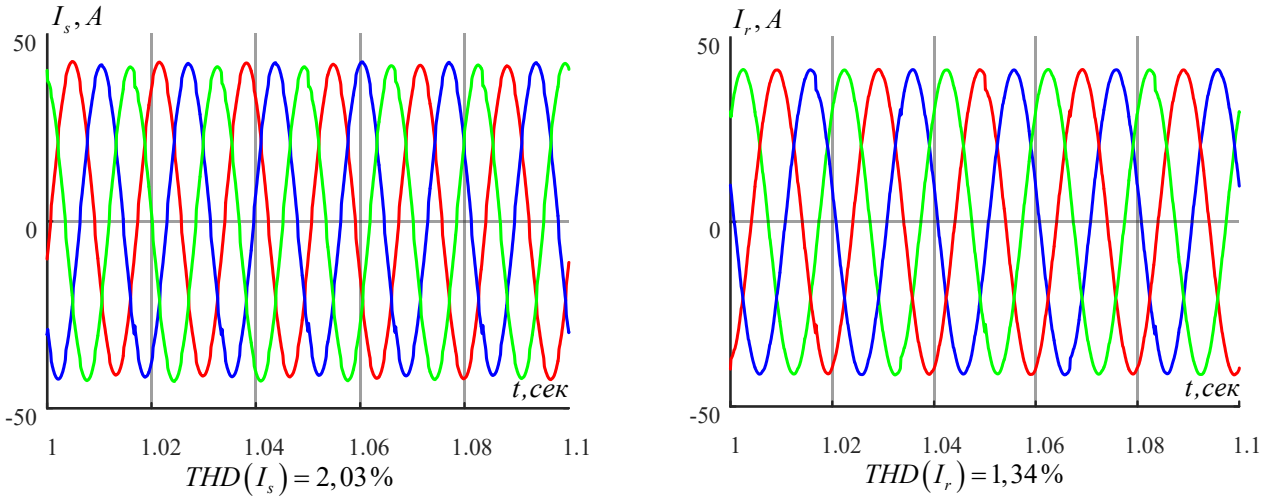


Рис.П10.6 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании

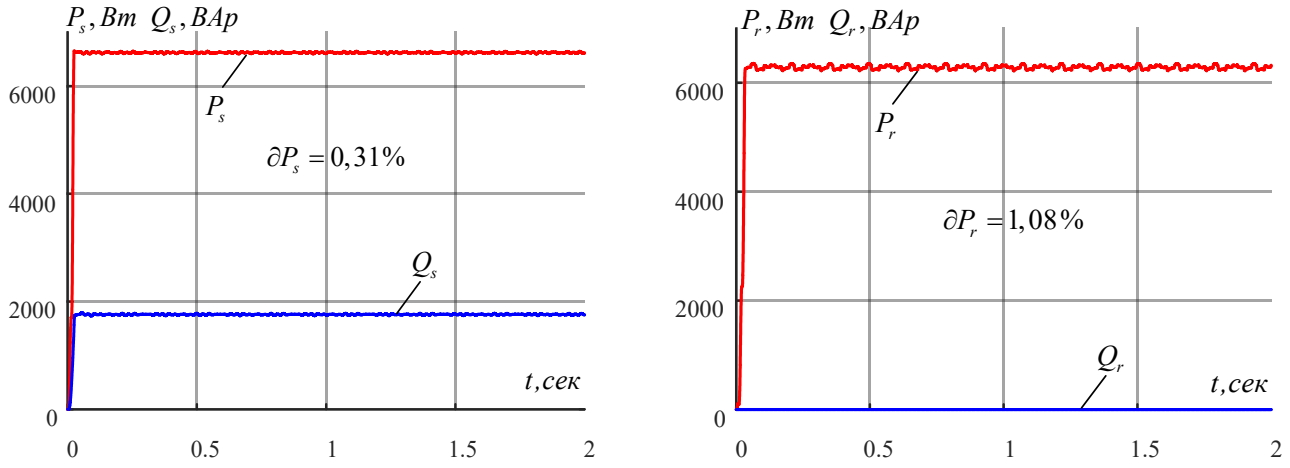


Рис.П10.7 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

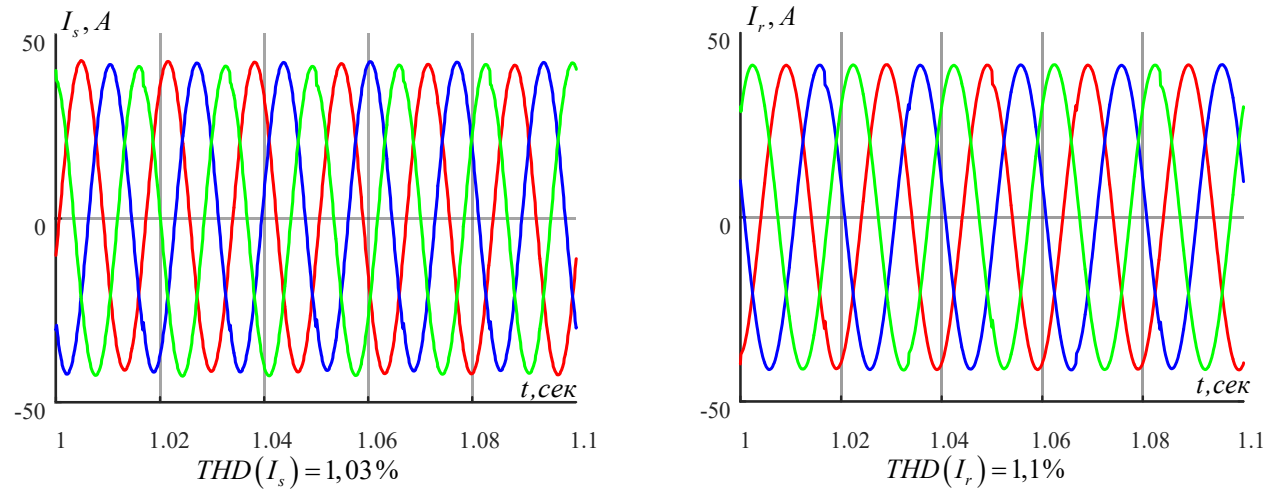


Рис.П10.8 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

Режим 30% уровня передаваемой мощности при двухканальном режиме работы устройства

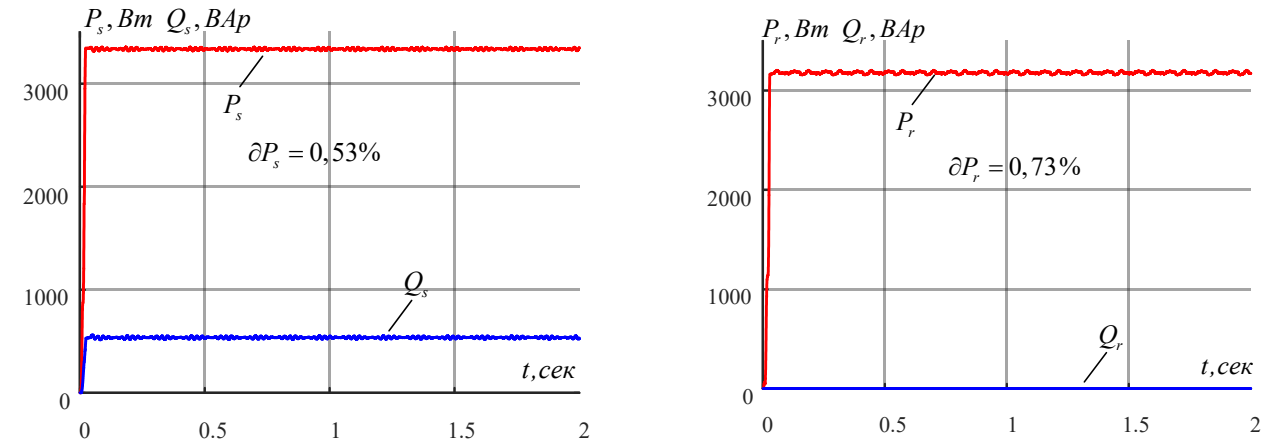


Рис.П10.9 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании

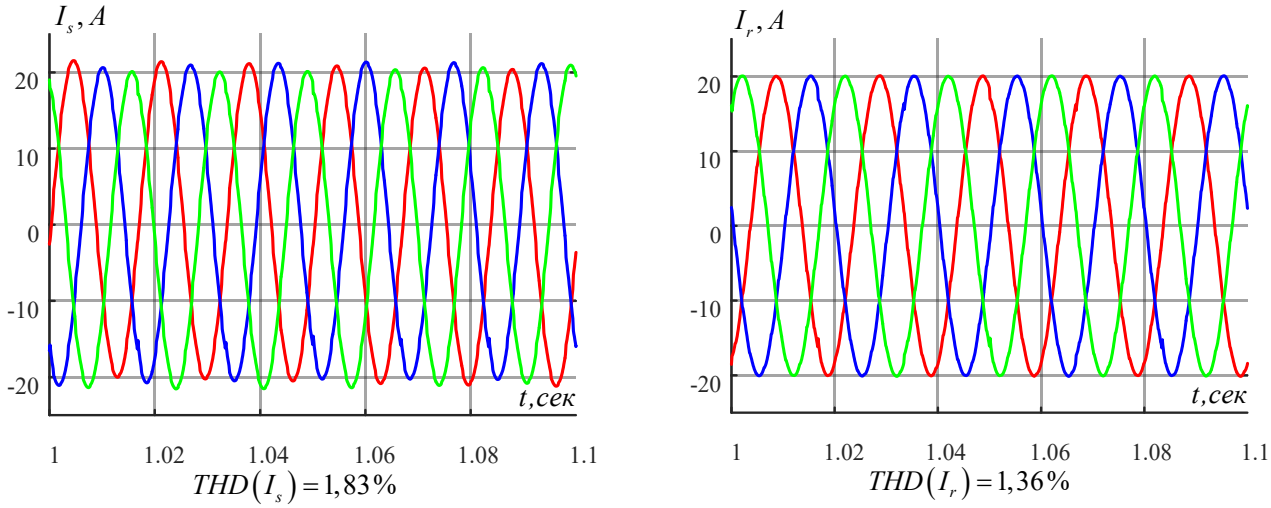


Рис.П10.10 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании

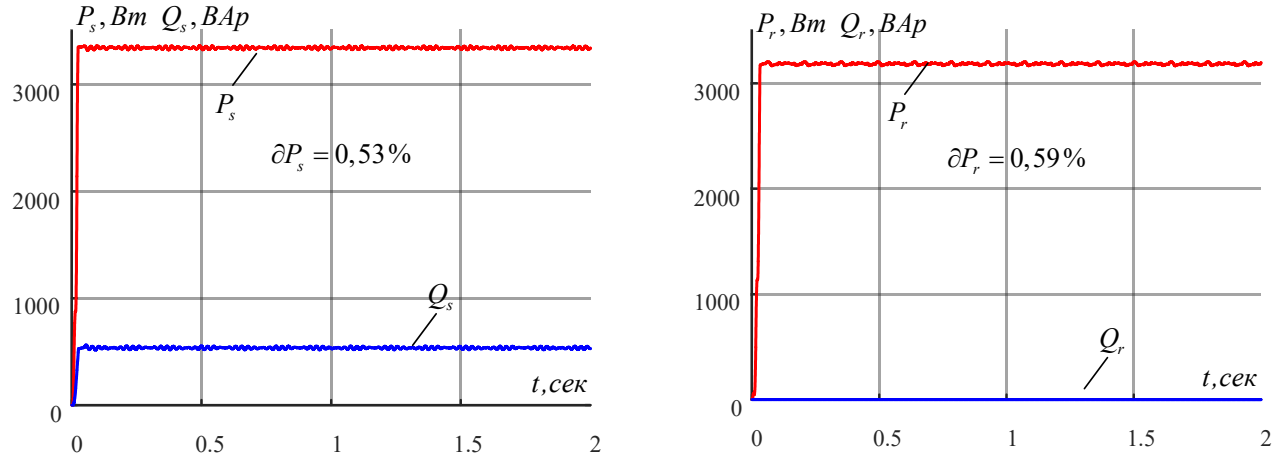


Рис.П10.11 Мощности на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

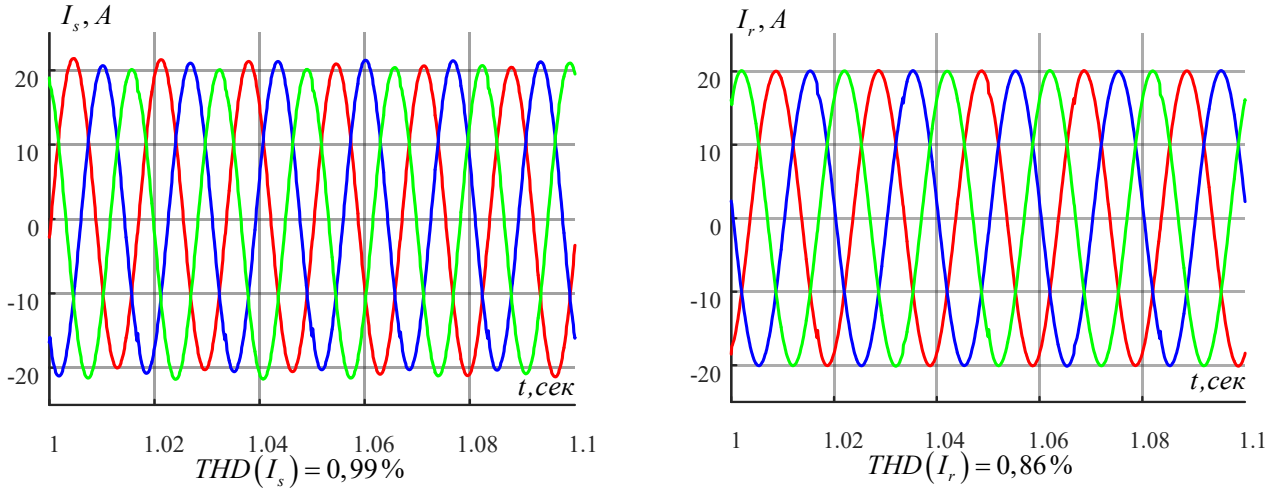


Рис.П10.12 Токи на передающей и приемной системах при двухканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

Режим 100% уровня передаваемой мощности при четырехканальном режиме работы устройства

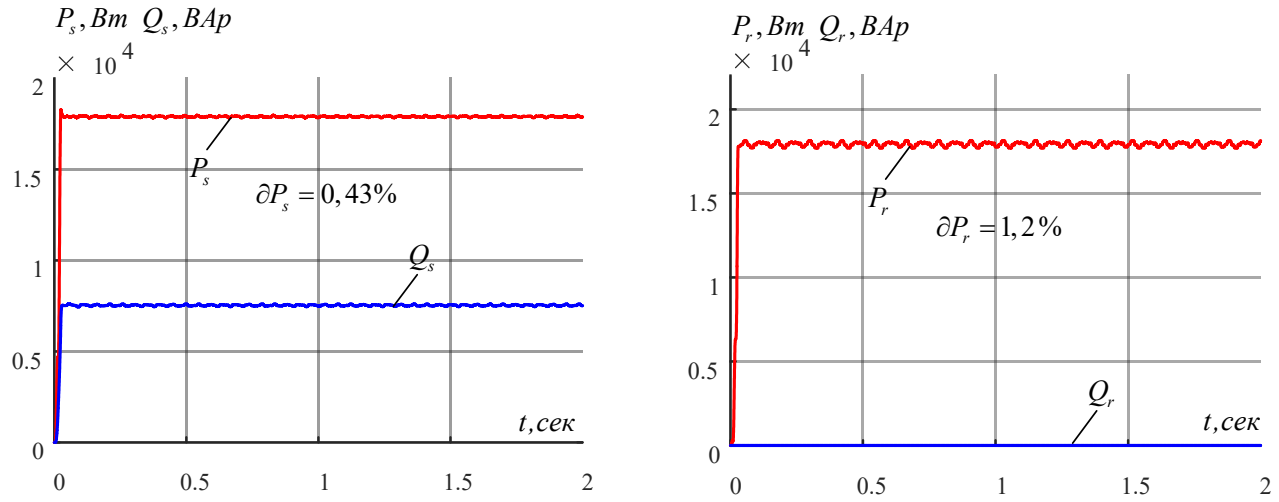


Рис.П10.13 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании

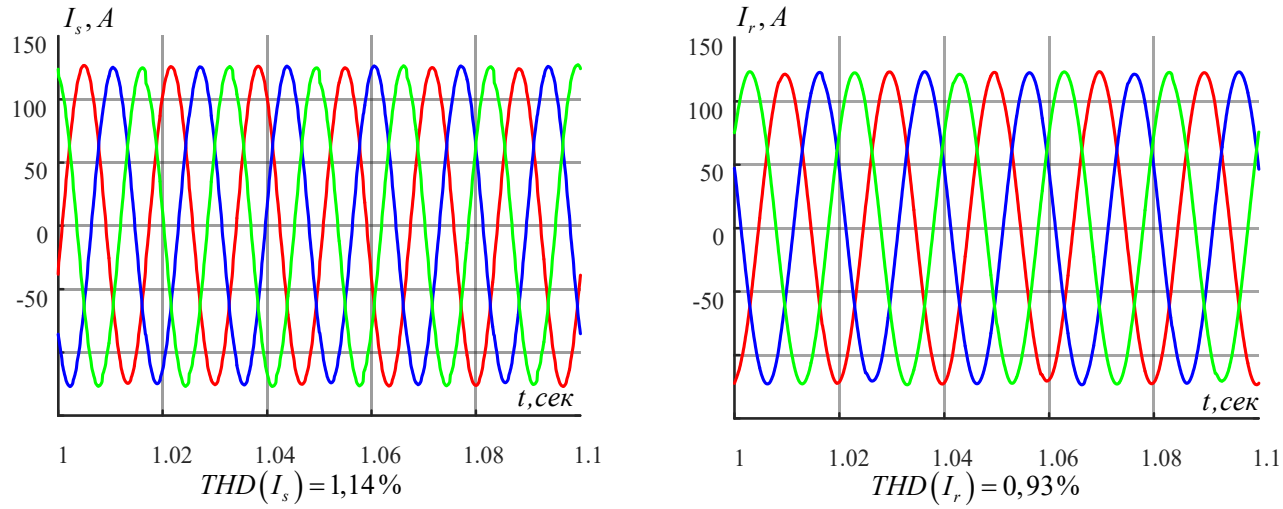


Рис.П10.14 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании

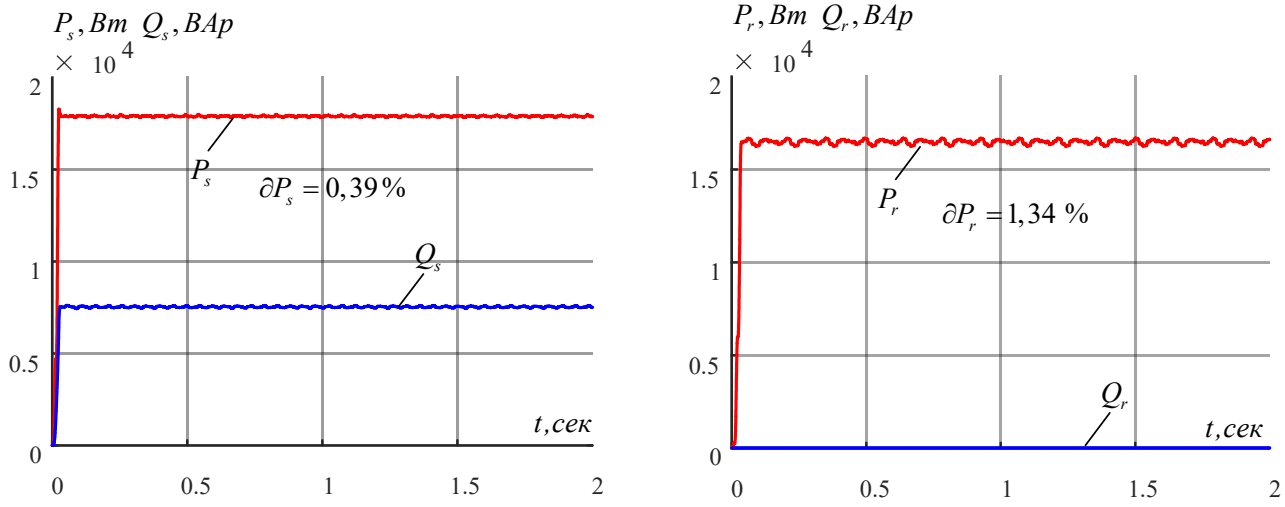


Рис.П10.15 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

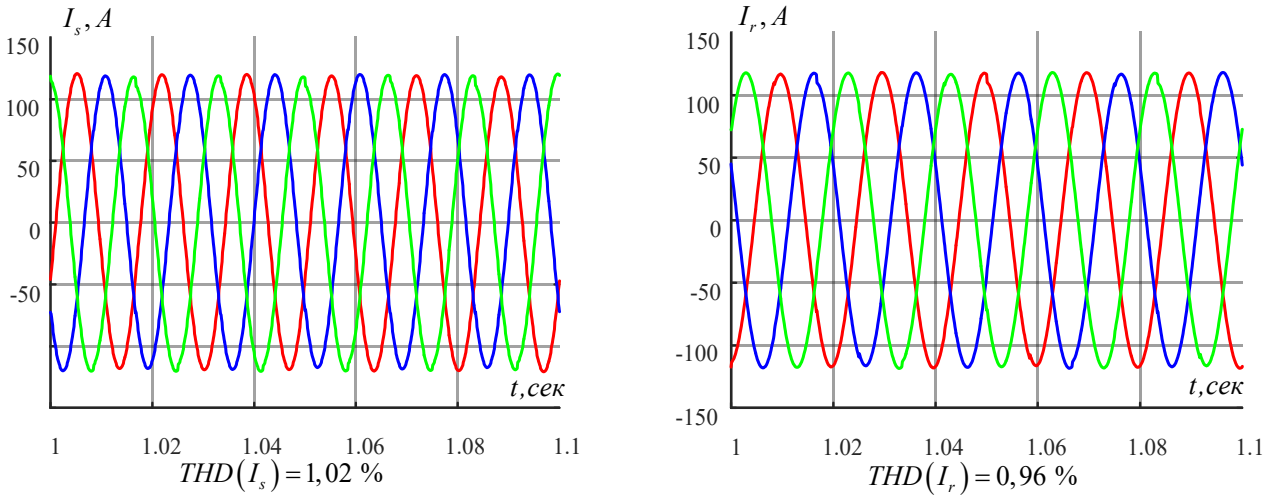


Рис.П10.16 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

Режим 65% уровня передаваемой мощности при четырехканальном режиме работы устройства

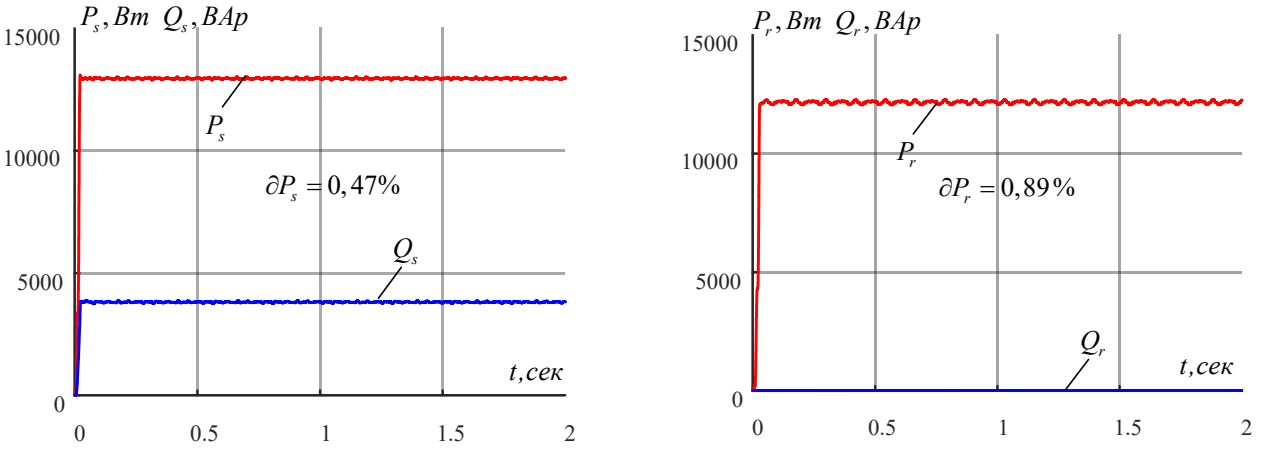


Рис.П10.17 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании

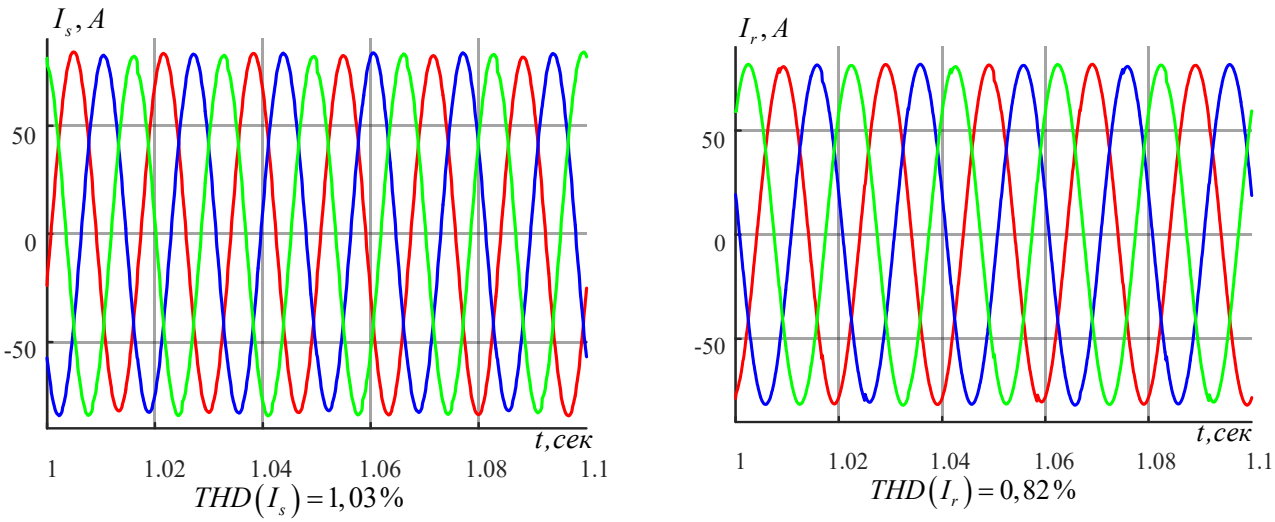


Рис.П10.18 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании

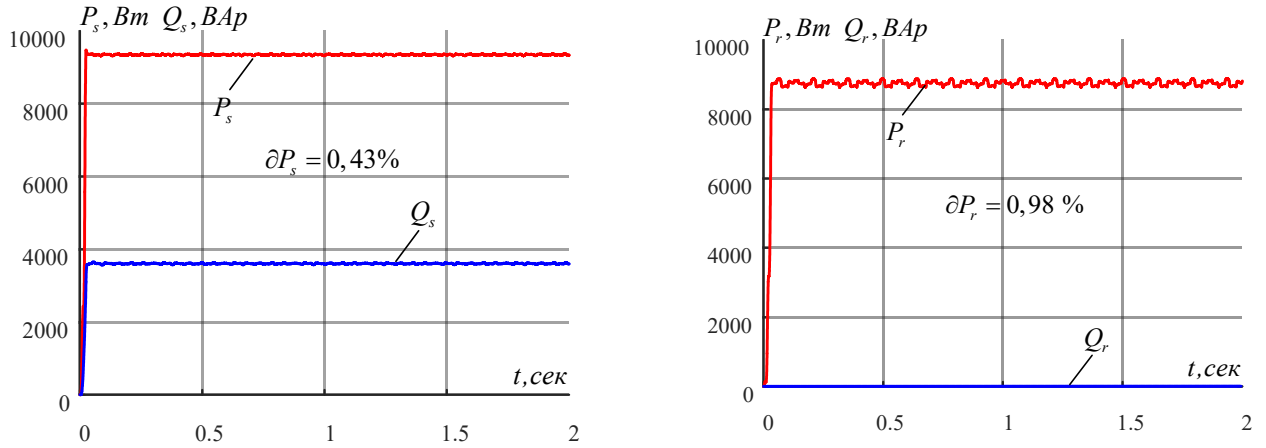


Рис.П10.19 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

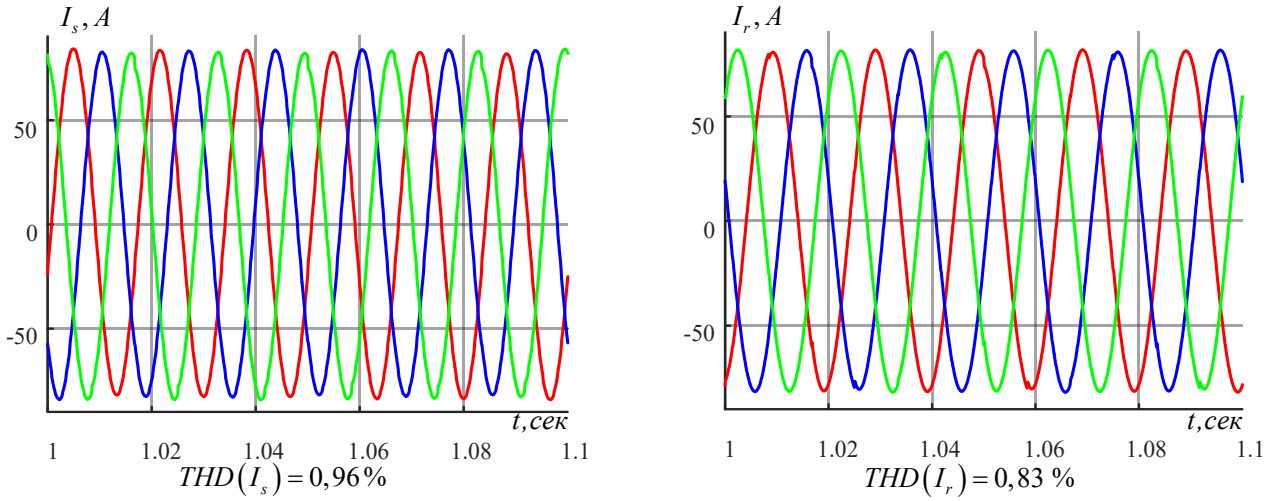


Рис.П10.20 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

Режим 30% уровня передаваемой мощности при четырехканальном режиме работы устройства

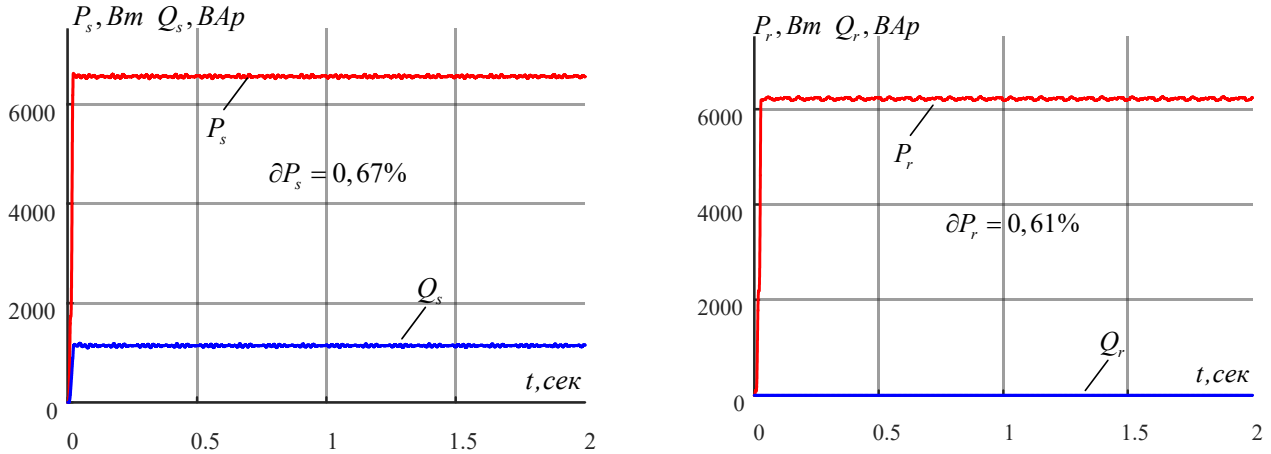
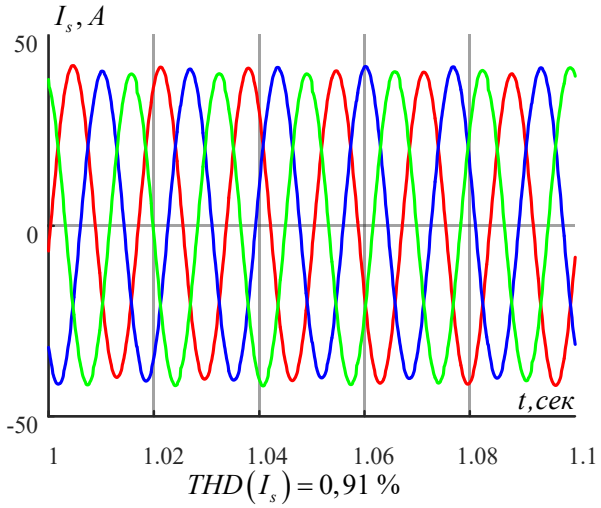


Рис.П10.21 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании



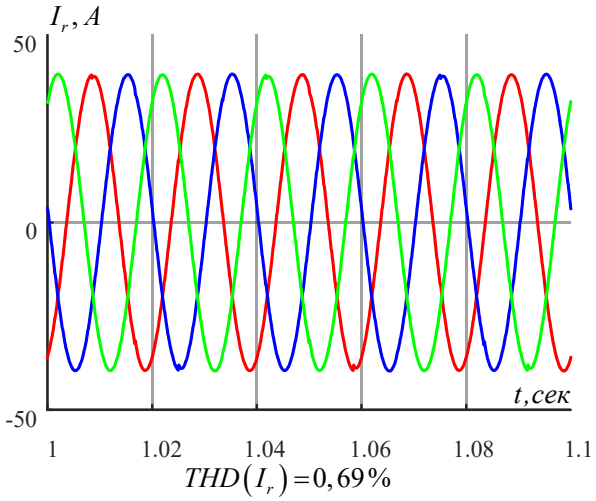
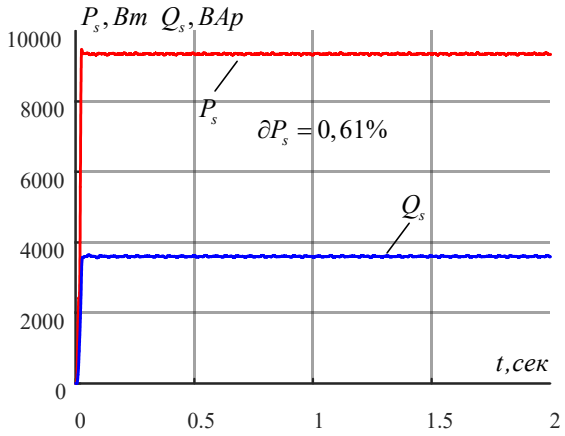


Рис.П10.22 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 24–х позиционном секционировании



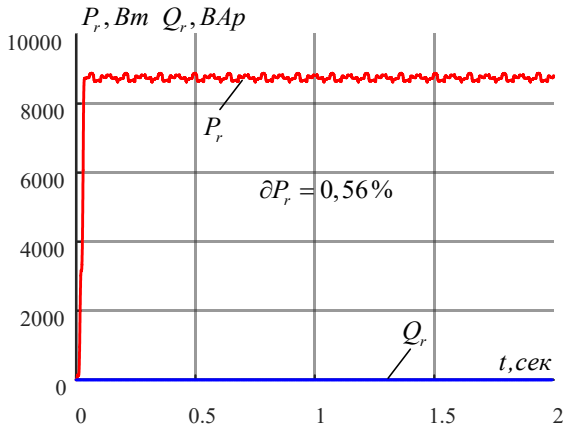
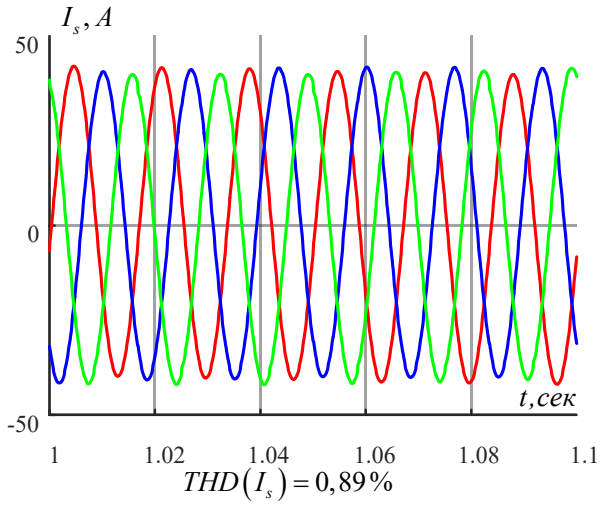


Рис.П10.23 Мощности на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании



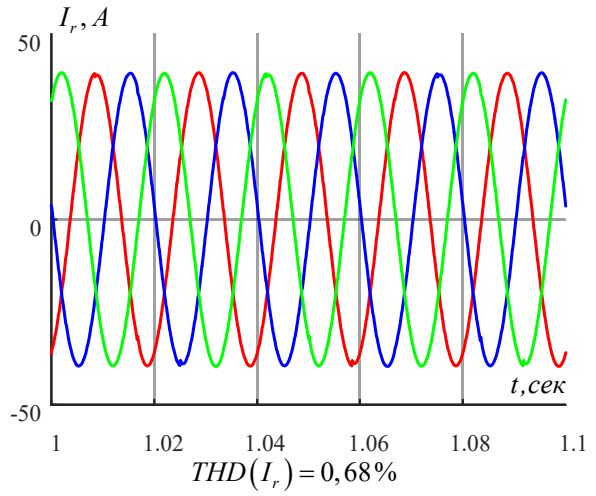


Рис.П10.24 Токи на передающей и приемной системах при четырехканальной схеме устройства и 48–и позиционном секционировании

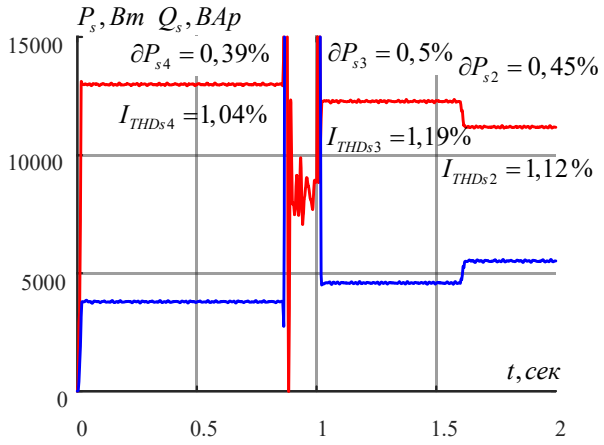


Рис.П10.25 Мощности на передающей системе при загрузке 100% от номинальной мощности устройства

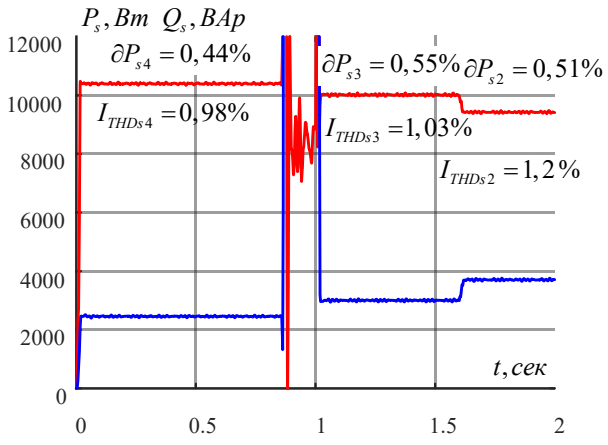


Рис.П10.26 Мощности на передающей системе при загрузке 65% от номинальной мощности устройства

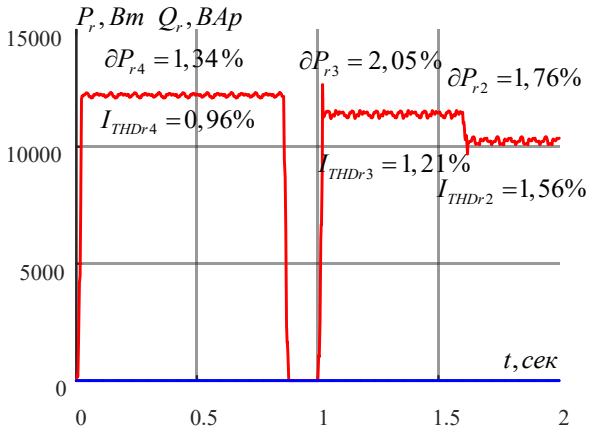


Рис.П10.27 Мощности на приемной системе при загрузке 100% от номинальной мощности устройства

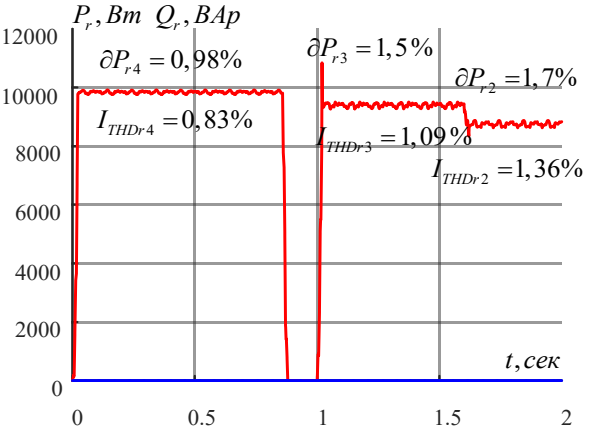


Рис.П10.28 Мощности на приемной системе при загрузке 65% от номинальной мощности устройства

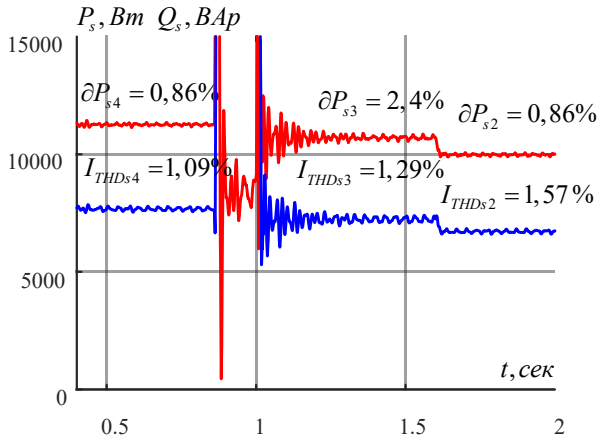


Рис.П10.29 Мощности на передающей системе при загрузке 100% от номинальной мощности устройства

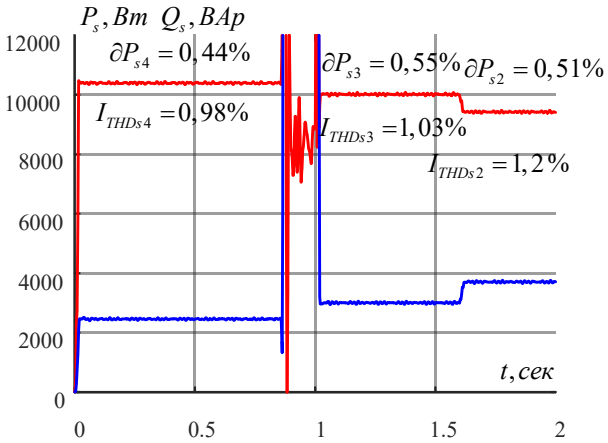


Рис.П10.30 Мощности на передающей системе при загрузке 65% от номинальной мощности устройства

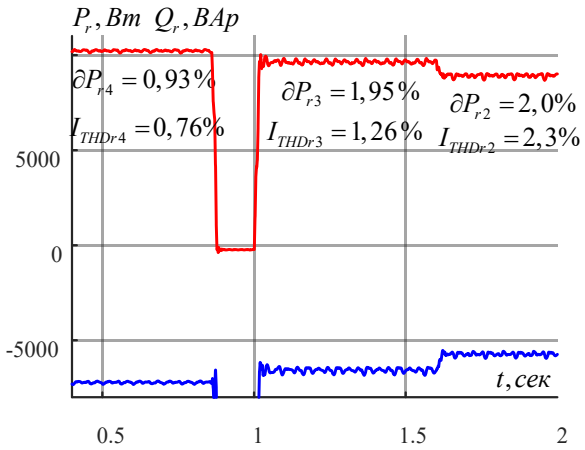


Рис.П10.31 Мощности на приемной системе при загрузке 100% от номинальной мощности устройства

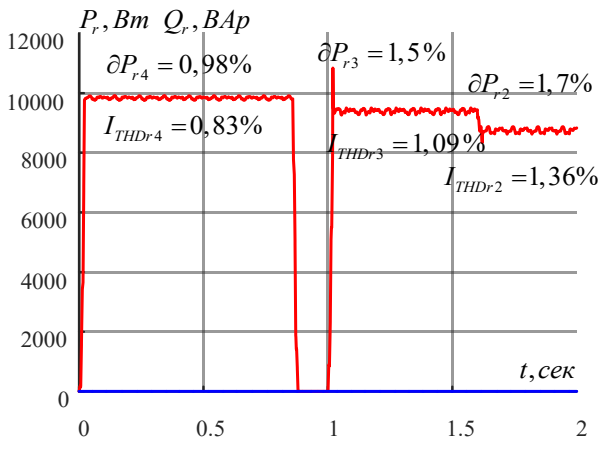


Рис.П10.32 Мощности на приемной системе при загрузке 65% от номинальной мощности устройства

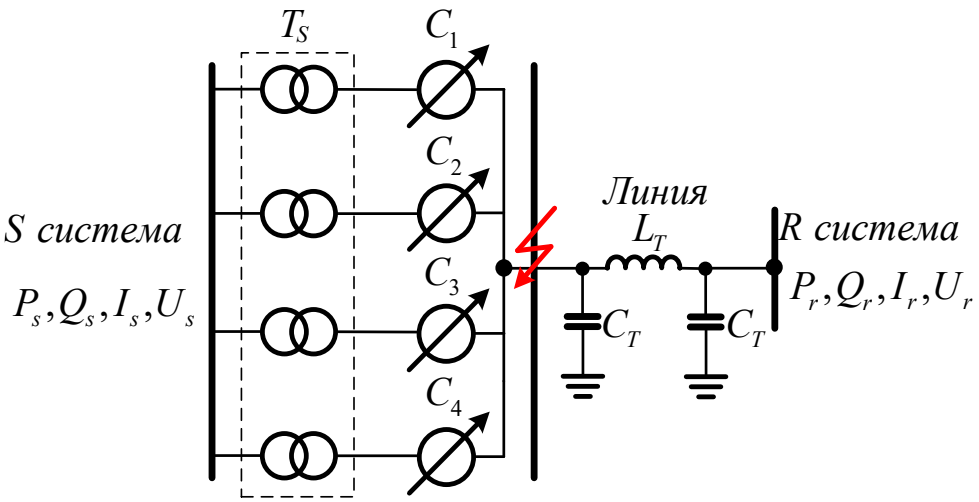


Рис.П10.33 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах приемной системы

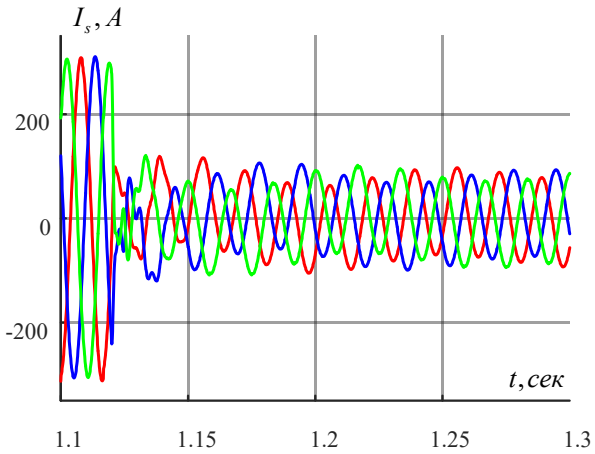


Рис.П10.34 Ток на передающей системе в момент отключения короткого замыкания

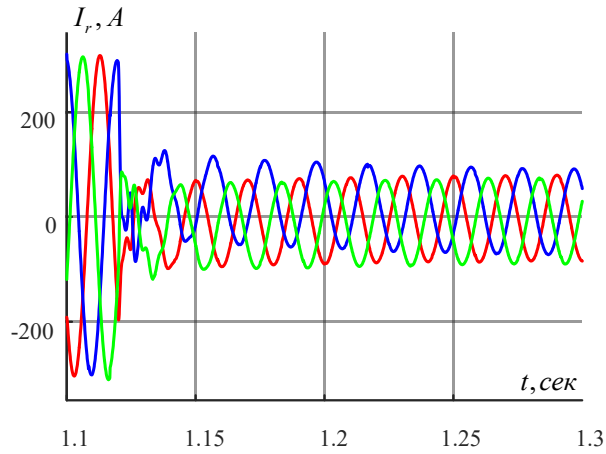


Рис.П10.35 Ток на приемной системе в момент отключения короткого замыкания

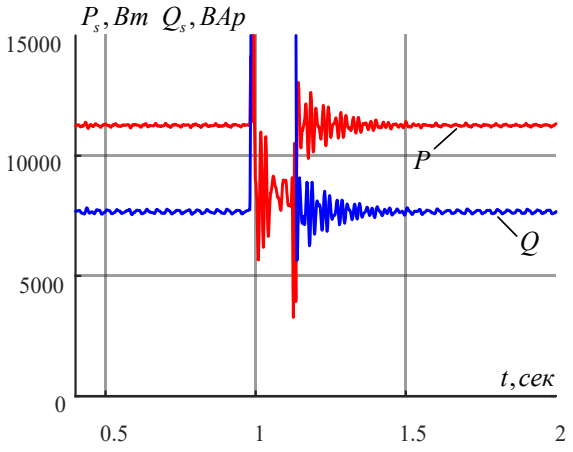


Рис.П10.36 Мощности на передающей системе

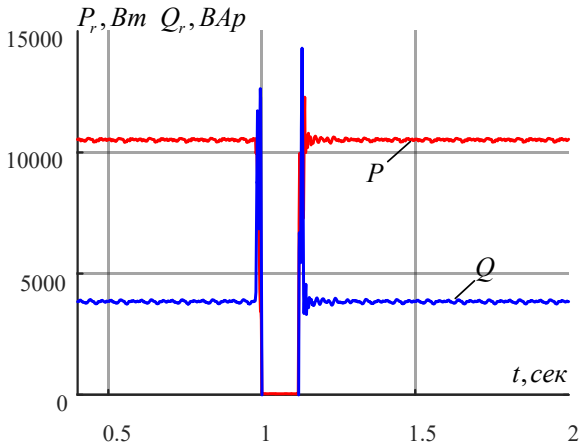


Рис.П10.37 Мощности на приемной системе

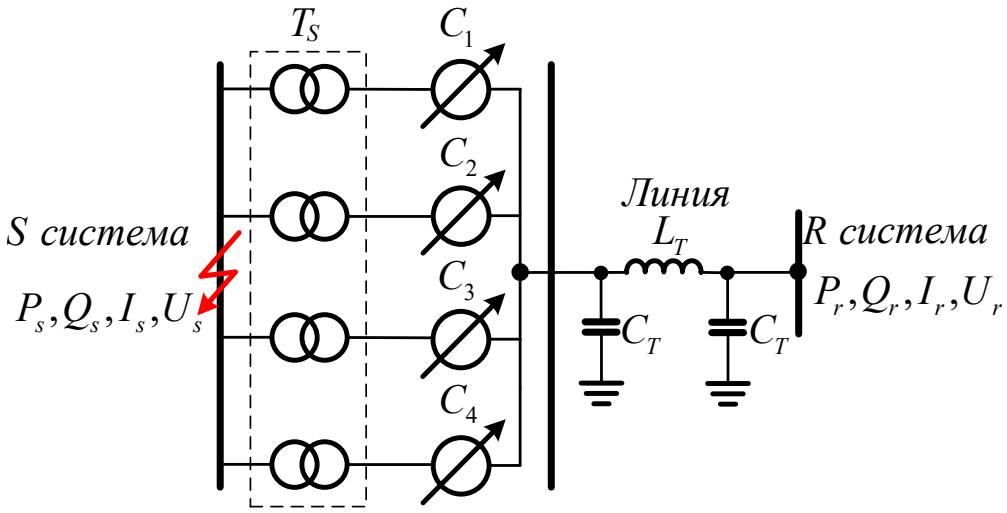


Рис.П10.38 Схема проведения эксперимента при коротком замыкании на шинах приемной системы

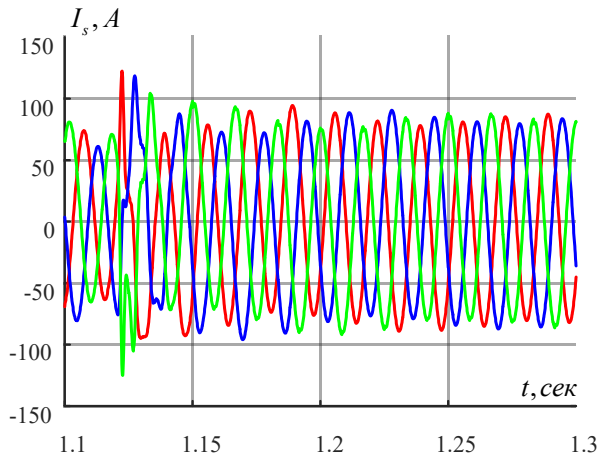


Рис.П10.39 Ток на передающей системе в момент отключения короткого замыкания

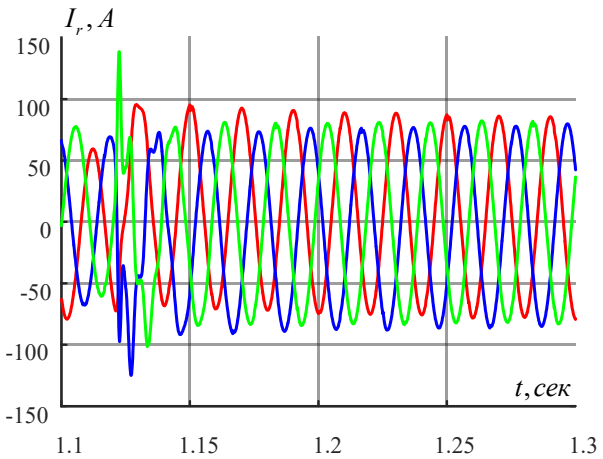


Рис.П10.40 Ток на приемной системе в момент отключения короткого замыкания

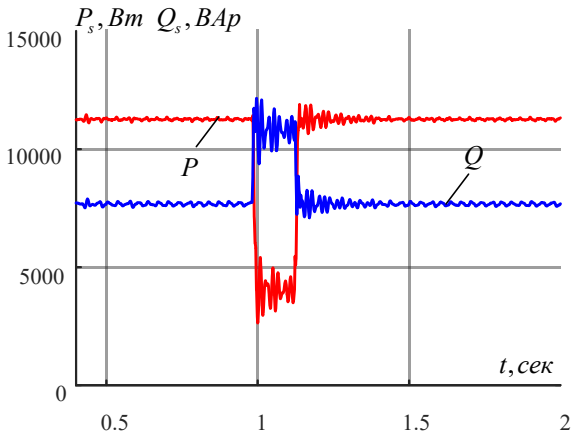


Рис.П10.41 Мощности на передающей системе

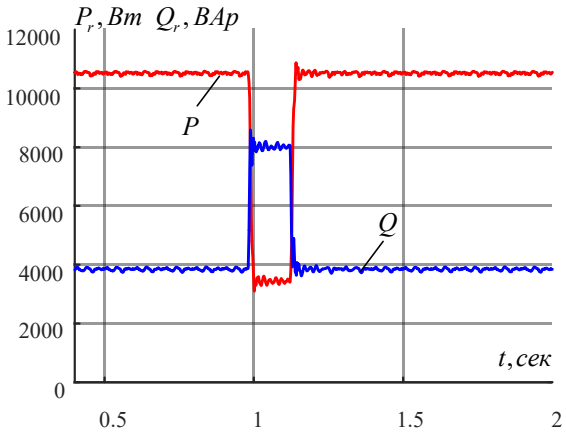


Рис.П10.42 Мощности на приемной системе