

На правах рукописи

Хасан Альван Хуссаин

**РАЗРАБОТКА РЕГУЛИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ ИРАКА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» (ИГЭУ).

Научный руководитель –
кандидат технических наук, профессор

Бушуева Ольга Александровна

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор

Курнышев Борис Сергеевич

кандидат технических наук, профессор

Белов Владимир Павлович

Ведущая организация

ГОУВПО «Московский энергетический институт»
(технический университет)

Защита диссертации состоится «11» декабря 2009 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», ауд.237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01.
E-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ, с авторефератом можно ознакомиться на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «10 » ноября 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В. В. Тютиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одними из основных вопросов, решаемых при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий, являются вопросы компенсации реактивной мощности: выбор типа, мощности, места установки и режима работы компенсирующего устройства (КУ). Компенсация реактивной мощности позволяет:

1. Обеспечивать баланс реактивной мощности в электрической сети предприятия.
2. Снижать потери мощности и электроэнергии в системе электроснабжения.
3. Улучшать показатели качества электроэнергии в системе электроснабжения промышленного предприятия.

Вопросы компенсации реактивной мощности актуальны для электрических сетей всех напряжений, как в России, так и в других странах. Эти вопросы актуальны и для систем электроснабжения промышленных предприятий Ирака, где в связи с окончанием военных действий идет интенсивное восстановление и строительство новых промышленных предприятий с использованием современных эффективных технологий и нового электрооборудования. Системы электроснабжения таких промышленных предприятий должны соответствовать требованиям к качеству электрической энергии.

В настоящее время в системах электроснабжения напряжением 380/220 В на промышленных предприятиях республики Ирак применяются только КУ на основе нерегулируемых конденсаторных батарей (КБ). Эти КУ не позволяют получить максимальный эффект от компенсации реактивной мощности при наличии потребителей электроэнергии с переменной нагрузкой, поэтому необходимо применять быстродействующие регулируемые источники реактивной мощности (ИРМ).

Таким образом, весьма актуальной представляется задача разработки регулируемого источника реактивной мощности (РИРМ), создания его математической и компьютерной моделей, позволяющих проводить исследования режимов работы источника реактивной мощности при различных режимах нагрузки промышленного предприятия.

Целью диссертационной работы является разработка регулируемого источника реактивной мощности для систем электроснабжения промышленных предприятий напряжением до 1 кВ и исследование режимов его работы.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ существующих способов и средств компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий.
- проведена сравнительная оценка источников реактивной мощности с различными системами управления, применяемых в системах электроснабжения промышленных предприятий.
- выбрана схема источника реактивной мощности с тиристорами и регулируемыми реакторами для систем электроснабжения промышленных предприятий напряжением ниже 1 кВ.
- разработаны математическая и компьютерная модели регулируемого источника

реактивной мощности с использованием средств Matlab, Simulink, sim power Systems для исследования его режимов работы в системах электроснабжения с изменяющейся нагрузкой.

- разработана цифровая система управления (ЦСУ) источника реактивной мощности с использованием программного комплекса NI Multisim 10, позволяющей обеспечивать плавное регулирование реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий с переменной нагрузкой.
- проведены исследования режимов работы источника реактивной мощности.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы, принятые в теории электрических цепей, электротехники, применялись теоретическое и математическое имитационное моделирование с использованием функций Matlab, систем Simulink и NI Multisim 10.

Достоверность результатов работы подтверждается:

- корректностью выполненных расчетов на основе фундаментальных положений теоретических основ электротехники;
- использованием средств Matlab, Simulink, sim power Systems для моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана модель источника реактивной мощности с применением средств Matlab, Simulink, sim power Systems, позволяющая исследовать различные режимы источника реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий.

2. Разработаны структурная схема и модель цифровой системы управления источника реактивной мощности с использованием программного комплекса NI Multisim 10, обеспечивающие быстродействующую компенсацию реактивной мощности нагрузки и улучшение показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Практическая значимость работы.

1. Получены регулировочные характеристики ИРМ, позволяющие анализировать спектральный состав токов и напряжений и намечать мероприятия по исключению резонансных явлений в системе электроснабжения промышленного предприятия.

2. Даны рекомендации по настройке цифровой системы управления ИРМ, обеспечивающей быстродействие и изменение его реактивной мощности при различных режимах нагрузки промышленного предприятия.

Область применения результатов работы.

Разработанные модели ИРМ с ЦСУ для систем электроснабжения промышленных предприятий могут быть использованы в организациях, занимающихся разработкой ИРМ с целью выбора их состава и параметров.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- международная научно – техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии», XIII Бенардосовские чтения, Иваново: ИГЭУ, 2006 г.
- международная научно – техническая конференция студентов и аспирантов,

(Радиоэлектроника электротехника и энергетика), Москва: МЭИ (ТУ), 2007г.

- международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии», XIV Бенардосовские чтения, Иваново: ИГЭУ, 2007 г.
- II-я молодежная международная научная конференция «Тинчурские чтения», Казань: КГЭУ, 2007 г.
- международная научно – техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии», XV Бенардосовские чтения, Иваново: ИГЭУ, 2009 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе три – в издании, рекомендованном ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка использованной литературы из 75 наименований и трех приложений. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, включает 74 рисунка и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана важность задачи компенсации реактивной мощности в цеховых сетях промышленных предприятий республики Ирак. Обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели, задачи исследований и дана общая характеристика работы.

Первая глава посвящена подробному анализу современного социально – экономического состояния Ирака, а также состоянию и перспективам развития электроэнергетики страны.

Проведен анализ существующих и перспективных способов и средств регулирования напряжения в сетях промышленных предприятий и предложена их классификация.

Рассмотрены основные показатели качества электрической энергии с учетом различных факторов, обусловленных режимами работы, как системы электроснабжения, так и нагрузки.

Проведена оценка эффективности работы различных компенсирующих устройств. Показано, что наиболее целесообразно регулирование напряжения осуществлять за счет изменения потоков реактивной мощности КУ.

Проведен анализ схем ИРМ (рис. 1–6), используемых в системах электроснабжения промышленных предприятий. Рассмотрены достоинства и недостатки каждой из них.

Показано, что схемы с конденсаторными батареями имеют существенные преимущества, поэтому эти схемы используются в качестве основных ИРМ как в сетях с напряжением 380/220 В, так и в сетях с напряжением 6 – 10 кВ.

Проведена оценка эффективности регулирования напряжения с использованием КБ, которые снижают потери мощности и энергии в сети за счет изменения потоков реактивной мощности. Потери мощности в сети промышленного предприятия определяются по выражению:

$$\Delta P = \left[\left(\frac{P_{\Sigma}}{U} \right)^2 + \left(\frac{Q_{\Sigma}}{U} \right)^2 \right] \cdot R_{\Sigma} = \Delta P_a + \Delta P_p,$$

где ΔP_a – потери активной мощности, обусловленные активной нагрузкой, ΔP_p – потери активной мощности, обусловленные реактивной нагрузкой, R_{Σ} – эквивалентное активное сопротивление сети, $P_{\Sigma}, Q_{\Sigma}, U$ – параметры режима (эквивалентные электрические нагрузки и напряжение сети).

Расчетами установлено, что потери электрической энергии от перетоков реактивной нагрузки соизмеримы с потерями от чисто активной нагрузки.

Применение на промышленных предприятиях для компенсации реактивной мощности схем с КБ уменьшит составляющую ΔP_p за счет изменения Q_{Σ} на $(Q_{\Sigma} - Q_{KB})$, где Q_{KB} – мощность КБ.

В работе рассмотрены особенности схем КУ на основе КБ.

Базовой для всех схем является нерегулируемая КУ (рис. 1), в которой конденсаторы соединены по схеме треугольника (реже в звезду) и постоянно подключены на шины РП или ТП. Это КУ является самым простым, потери мощности в нем минимальны, поскольку определяются только потерями в конденсаторах: $\Delta P = 2\pi \cdot f \cdot C_{KB} U_{НОМ}^2 \operatorname{tg} \delta$, где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь в конденсаторах, равный относительной величине удельных потерь в конденсаторе, Вт/квар. Однако потери мощности ΔP в электрической сети промышленного предприятия при такой схеме КУ – максимальны.

Особенностью схемы рис. 2 является изменение мощности КБ за счет переключения конденсаторов с «треугольника» на «звезду». Схема при соединении конденсаторов в треугольник позволяет получить мощность $Q_{KB.MAX}$, а при соединением конденсаторов в звезду – $Q_{KB.min}$ (в три раза меньше $Q_{KB.MAX}$). Эта схема проста, но имеет большое качество коммутационной аппаратуры (контакторы или тиристорные ключи), и процесс коммутации сложен.

При больших мощностях нагрузок и их неравномерном графике используют КУ с регулированием реактивной мощности за счет переключения конденсаторов ступенями (рис. 3). Чем больше число ступеней регулирования у такого компенсирующего устройства, тем выше его эффективность, но усложняется система управления. На практике у таких КУ число ступеней не превышает трех.

Схема рис. 4 представляет схему одного из вариантов статического тиристорного компенсатора (СТК) с регулируемой индуктивностью (реактором). За счет использования тиристоров, включенных последовательно с реактором, реактивная мощность Q_L плавно изменяется, а генерируемая мощность (емкостная) не регулируется. Недостатком этой схемы также является генерация в сеть промышленного предприятия токов высших гармоник от тиристоров.

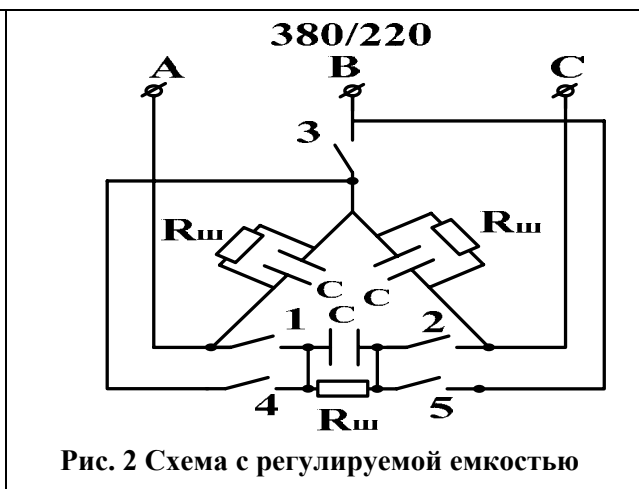
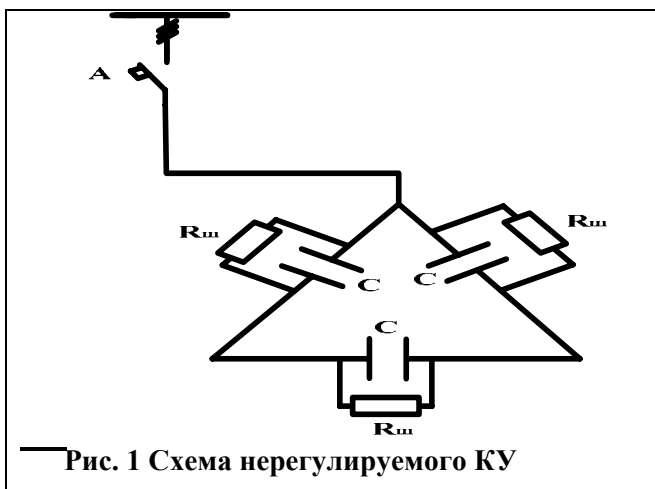
Анализ схемы рис. 5 показал, что схема позволяет осуществлять достаточно плавное регулирование реактивной мощности при относительно малой мощности реактора Q_L и, следовательно, потери энергии в нем небольшие ($Q_L = \frac{Q_{KB}}{2N}$, где N –

число ступеней регулирования). В этой схеме возможны два принципиально разных режима работы КУ. В первом режиме регулирование КБ осуществляется ступенями, а мощность реактора L равна половине мощности ступени конденсаторов. Во втором режиме мощность реакторов L равна мощности одной ступени конденсаторов и изменяется с помощью тиристорного регулятора VS . В этой схеме обеспечивается плавное регулирование реактивной мощности, необходимое быстрое действие, а так же мощность реакторов в N раз меньше значения высших гармоник тока генерируемых тиристорами.

Проведенные исследования показали, что схема рис. 6. имеет три ступени регулирования $C_1=C_2=C_3$, в каждой из которых конденсаторы соединены в треугольник и подключаются к трехфазной сети через токоограничивающие реакторы L_0 и тиристорные ключи $VS1$. Тиристорные ключи $VS1$ располагаются только в двух фазах, что позволяет уменьшить потери мощности в устройстве коммутации КБ на одну треть. В этом заключается первое отличие схемы (РИРИ) от других схем.

Вторая особенность схемы РИРМ заключается в том, что реакторы L с последовательно включенными тиристорными регуляторами $VS2$ соединены по схеме треугольника и служат для уменьшения токов высших гармоник. Мощность реакторов L в этой схеме равна мощности одной ступени БК, принятой 25 квар. Третья особенность заключается в законе регулирования реактивной мощности. Регулирование производится небольшими ступенями, переключение которых осуществляет цифровая система управления. За счет изменения угла открытия тиристорного регулятора $VS2$ можно получить 4 ступени реактивной мощности, потребляемой реакторами, 25, 50, 75, 100 %. Поэтому для моделирования источника реактивной мощности выбрана эта схема, которая имеет название «регулируемый источник реактивной мощности» (РИРМ).

В работе проведено сравнение всех схем источников реактивной мощности, имеющих в своем составе КБ, по ряду параметров, в том числе и по коэффициенту эффективности. Лучшие показатели имеет схема рис. 6.



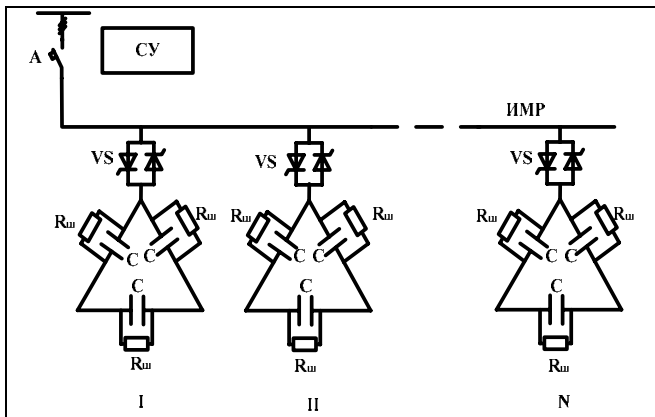


Рис. 3 Схема источника реактивной мощности со ступенчатым регулированием

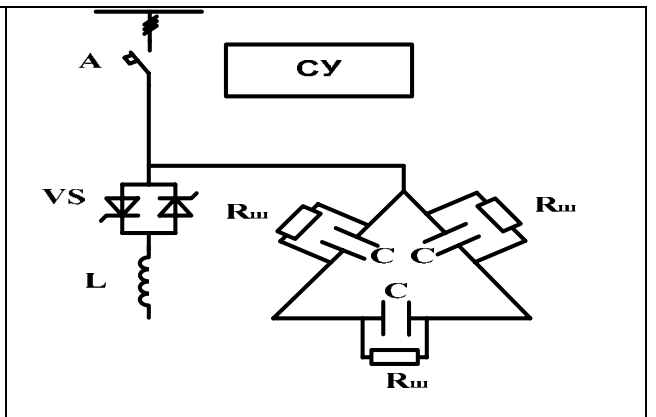


Рис. 4 Схема СТК с регулируемой индуктивностью (тиристорно-реакторная группа)

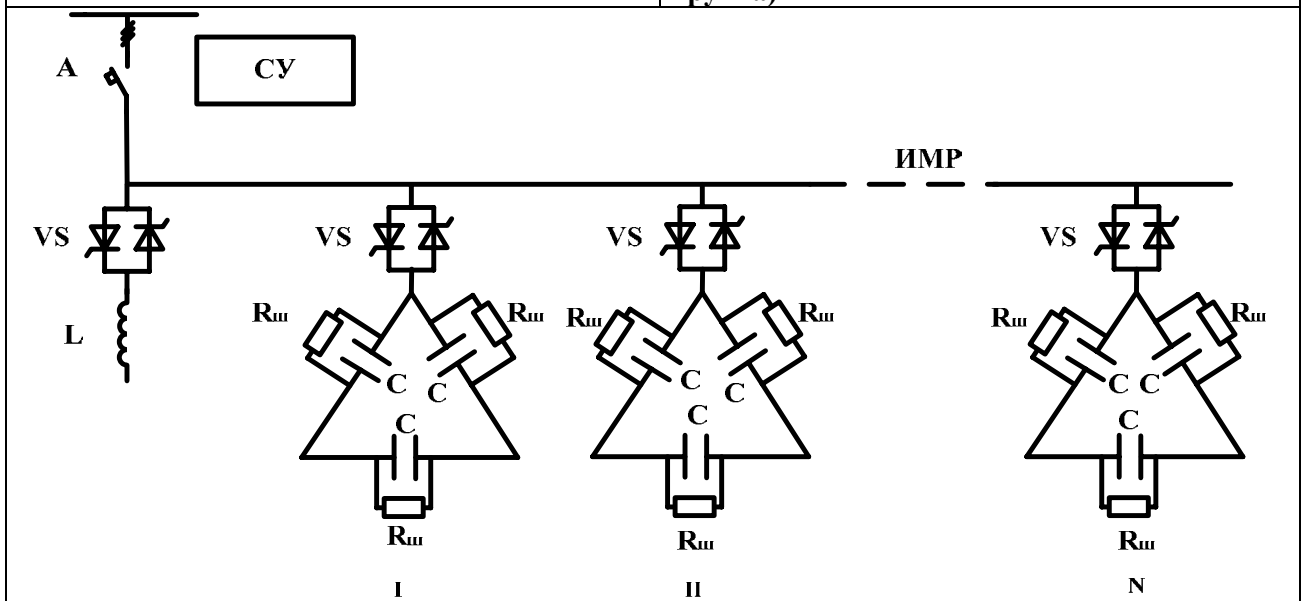


Рис. 5 Схема СТК с регулируемой индуктивностью и регулируемой емкостью (ступенчатой)

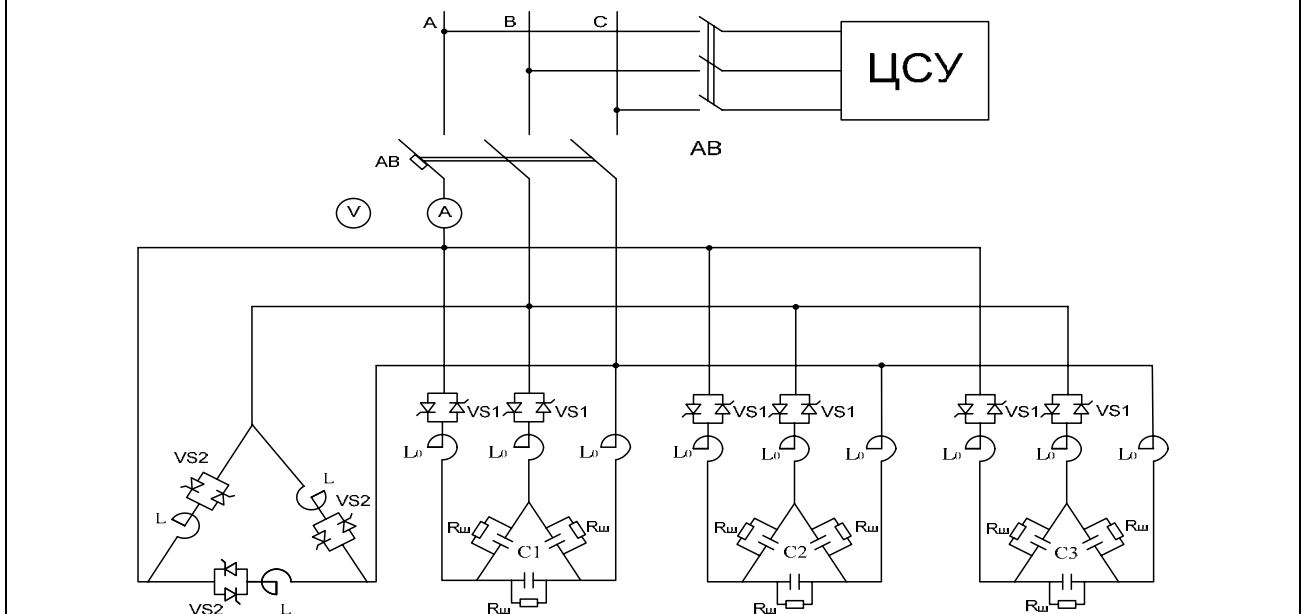


Рис. 6 Принципиальная схема регулируемого источника реактивной мощности

Во второй главе разработана модель схемы РИПМ (рис. 6) с использованием средств MATLAB, Simulink, sim Power Systems, для создания которой необходимо одно из следующих условий:

1. Принципиальная или функциональная схема объекта моделирования.
2. Уравнения, описывающие моделируемую систему.
3. Результаты измерения входных и выходных сигналов моделируемой системы.

При разработке модели РИПМ (рис. 7) использовано первое условие.

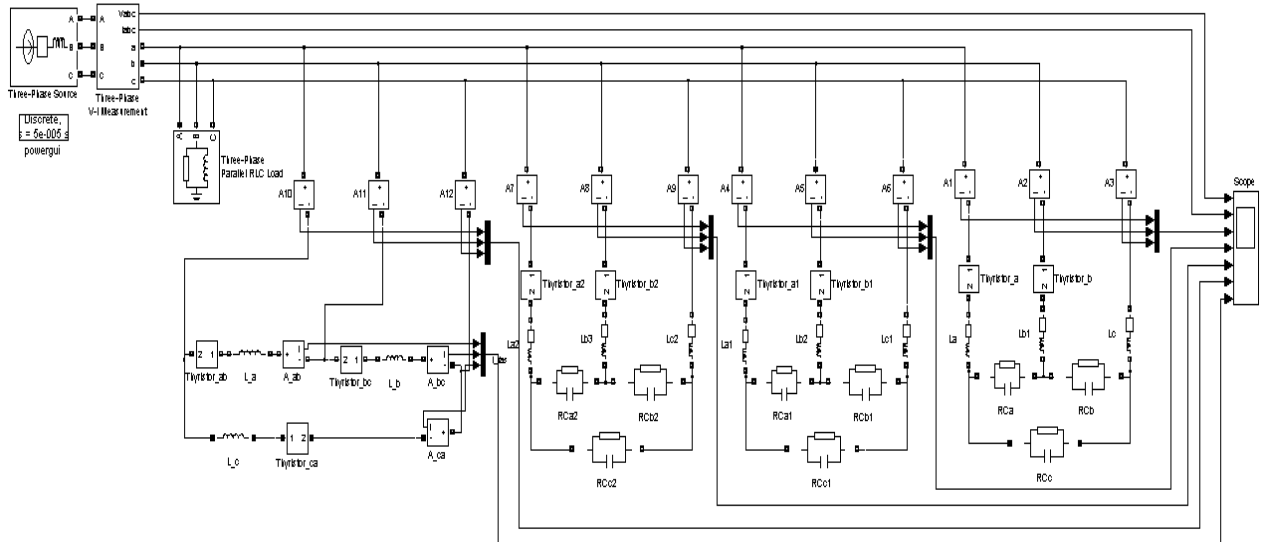


Рис. 7 Модель регулируемого источника реактивной мощности

При разработке модели РИПМ (рис. 7) использованы средств программы Simulink и toolbox Sim power Systems. Для проверки работы схемы РИПМ, а так же из-за появления в модели высших гармоник, моделирование проводилось по отдельным блокам (рис. 8 – 10).

На рис. 8 представлена модель трехфазного источника питания (сеть), содержащая блок Three-Phase Source, имеющий три источника ЭДС, сдвинутых по фазе друг на угол 120° .

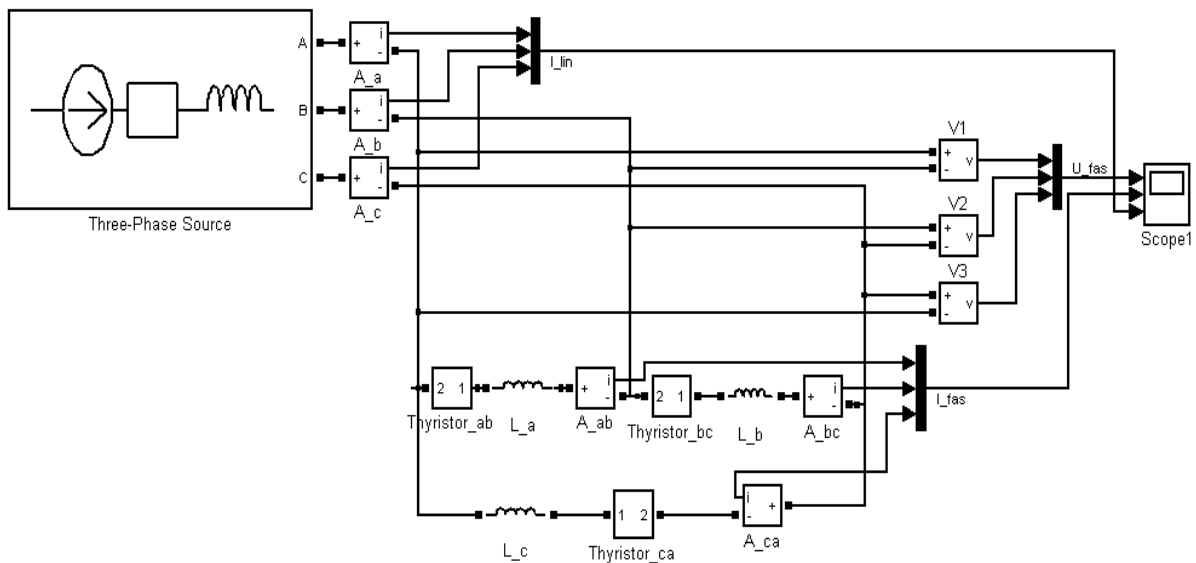


Рис. 8 Модель блока регулируемой части источника реактивной мощности

В схеме замещения (рис. 9) представлена модель блока тиристора со схемой управления.

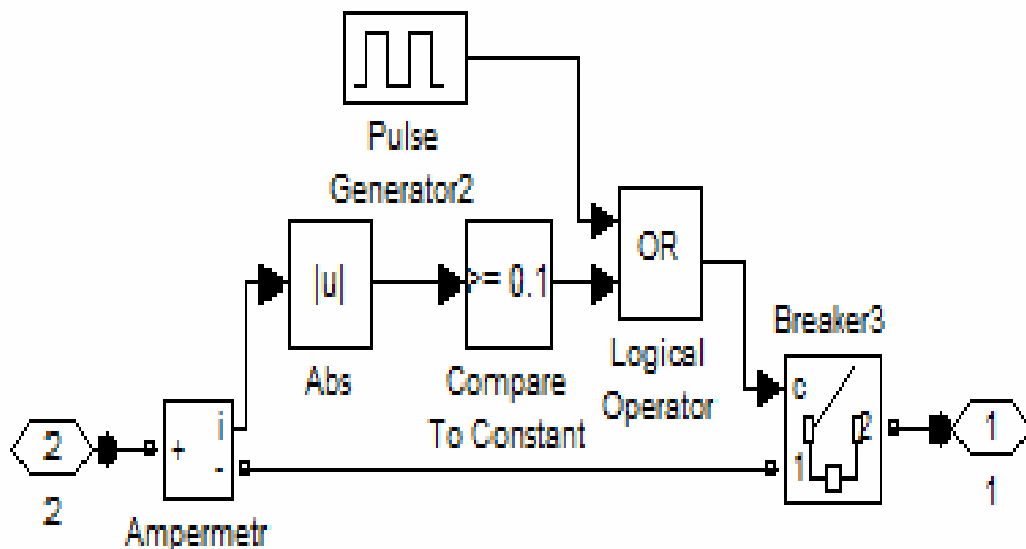


Рис. 9 Модель блока тиристора со схемой управления

Следует отметить, что в библиотеке Simulink отсутствует модель симметричного управляемого вентиля. Для его реализации использованы также средства Matlab, Simulink и имеющиеся, в данном пакете (toolbox).

В модели учтены следующие особенности тиристорov:

1. Тиристор переходит в открытое состояние с помощью управляющего сигнала, подаваемого на управляющий электрод.
2. Тиристор переходит в закрытое состояние самопроизвольно при переходе тока через ноль.

При моделировании тиристорov сделаны следующие допущения:

- а) Переход из открытого состояния в закрытое и наоборот происходит мгновенно.
- б) Сопротивления тиристорov в открытом и закрытом состояниях представлены постоянными величинами.

В моделях тиристорov заложен алгоритм управления углом их открывания. Таким образом, регулируя угол, можно исследовать зависимость частотного спектра от времени запаздывания при открывании тиристорov.

Время включения тиристорov определялось, исходя из запаздывания перехода фазного тока (тока через реакторы) на 90° от фазного напряжения. Идеальное время включения тиристорov в регулирующей схеме обеспечивает коммутацию, при которой в переходном процессе отсутствует свободная составляющая тока (другими словами, в момент коммутации принужденная составляющая тока должна переходить через ноль).

Модель содержит измерительные блоки (аналоги трансформаторов тока и напряжения) выходные сигналы которых поступают на осциллограф (Scope). Здесь сигналы анализируются визуально, а также данные, поступившие в осциллограф, передаются на анализатор спектра. В анализаторе спектра с

помощью быстрого преобразования Фурье исследуется наличие высших гармоник и их величина.

В моделируемой схеме содержатся элементы (тиристоры) которые плавно переходят из одного состояния в другой.

Модель РИРМ содержит блока конденсаторных батарей рис. 10.

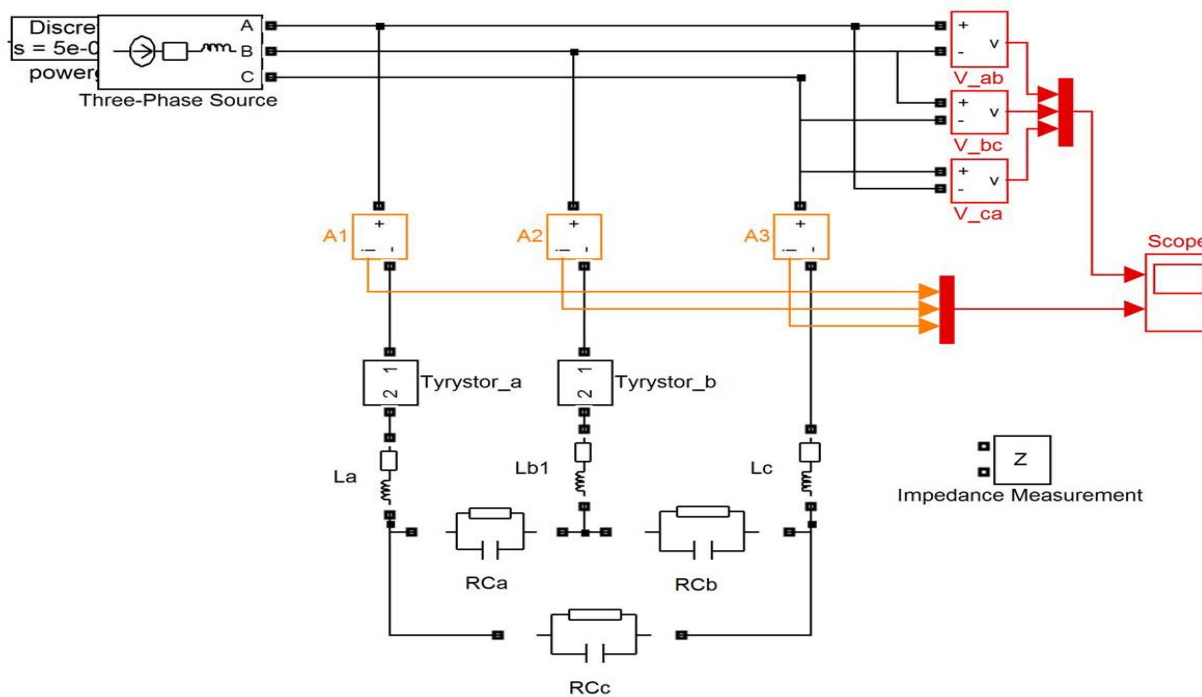


Рис. 10 Модель блока конденсаторных батарей

Модель конденсаторных батарей содержит трехфазный источник напряжения Three-Phase Source, схема замещения которого состоит из трех источников ЭДС, сдвинутых по фазе друг относительно друга на угол 120° и активных внутренних и реактивных сопротивлений.

Конденсаторные батареи соединены в треугольник, параллельно которым включены резисторы, служащие для разряда емкостей при отключении БК. На схеме рис. 10 они обозначены (R_{Ca} , R_{Cb} , R_{Cc}). Конденсаторная батарея подключена через токоограничивающие реакторы (L_o), обозначенные на схеме как L_a , L_b , L_c . Управляемые тиристоры (Thyristor_a, Thyristor_b) находятся в фазах А и В. Схема также содержит измерительные трансформаторы тока, измеряющие линейные токи ($A1$, $A2$, $A3$), и измерительные трансформаторы напряжения $V1$, $V2$, $V3$, измеряющие соответственно линейные напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} .

Разработана математического модель регулируемой часть источника реактивной мощности, основанная на метода переменных состояний, использующая основные соотношения теоретических основ электротехники.

В схеме замещения блока регулируемой части источника реактивной мощности (рис. 11) отражены основные элементы, изменения величины которых позволяют настраивать модель в соответствии с режимом питающей сети.

Математическая модель включает численное решение дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} X = Ax + Bu \\ Y = Cx + Du \end{cases},$$

где A, B, матрицы, состоящие из коэффициентов уравнений:

$$\begin{cases} \frac{diab}{dt} = -\frac{Rab + Ra + Rb}{Lab}iab + \frac{Rb}{Lab}ibc + \frac{Ra}{Lab}ica + \frac{Ea}{Lab} - \frac{Eb}{Lab} - \frac{UTab}{Lab} \\ \frac{dibc}{dt} = \frac{Rb}{Lbc}iab - \frac{Rbc + Rb + Rc}{Lbc}ibc + \frac{Rc}{Lbc}ica + \frac{Eb}{Lbc} - \frac{Ec}{Lbc} - \frac{UTbc}{Lbc} \\ \frac{dica}{dt} = \frac{Ra}{Lca}iab + \frac{Rc}{Lca}ibc - \frac{Rca + Rc + Ra}{Lca}ica + \frac{Ec}{Lca} - \frac{Ea}{Lca} - \frac{UTca}{Lca} \end{cases}.$$

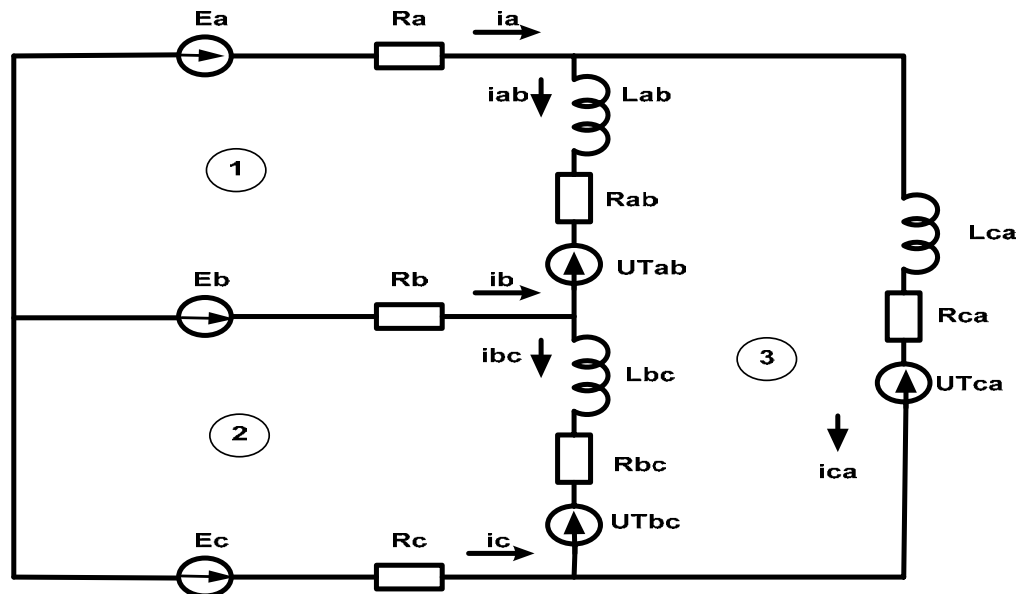


Рис. 11 Схема замещения модели блока регулируемой части ИРМ

В третьей главе разработана цифровая система управления (ЦСУ) вентильными преобразователями для обеспечения работы регулируемого источника реактивной мощности (рис. 12) в соответствии с изменением графика нагрузки в системе электроснабжения.

ЦСУ вырабатывает в цифровой форме код фазы управляющих импульсов тиристоров и затем преобразует его в фазу управляющих импульсов.

В ЦСУ используется линейная форма опорного сигнала.

Цифровая схема сравнения (ЦСС) фиксирует поразрядное равенство управляющего и опорного кодов. При этом на выходе ЦСС формируется единичный логический сигнал. Этот сигнал поступает на управляющий электрод тиристора VS2. Входной сигнал, получаемый при подключении системы к трехфазной сети, представлен на рис. 13.

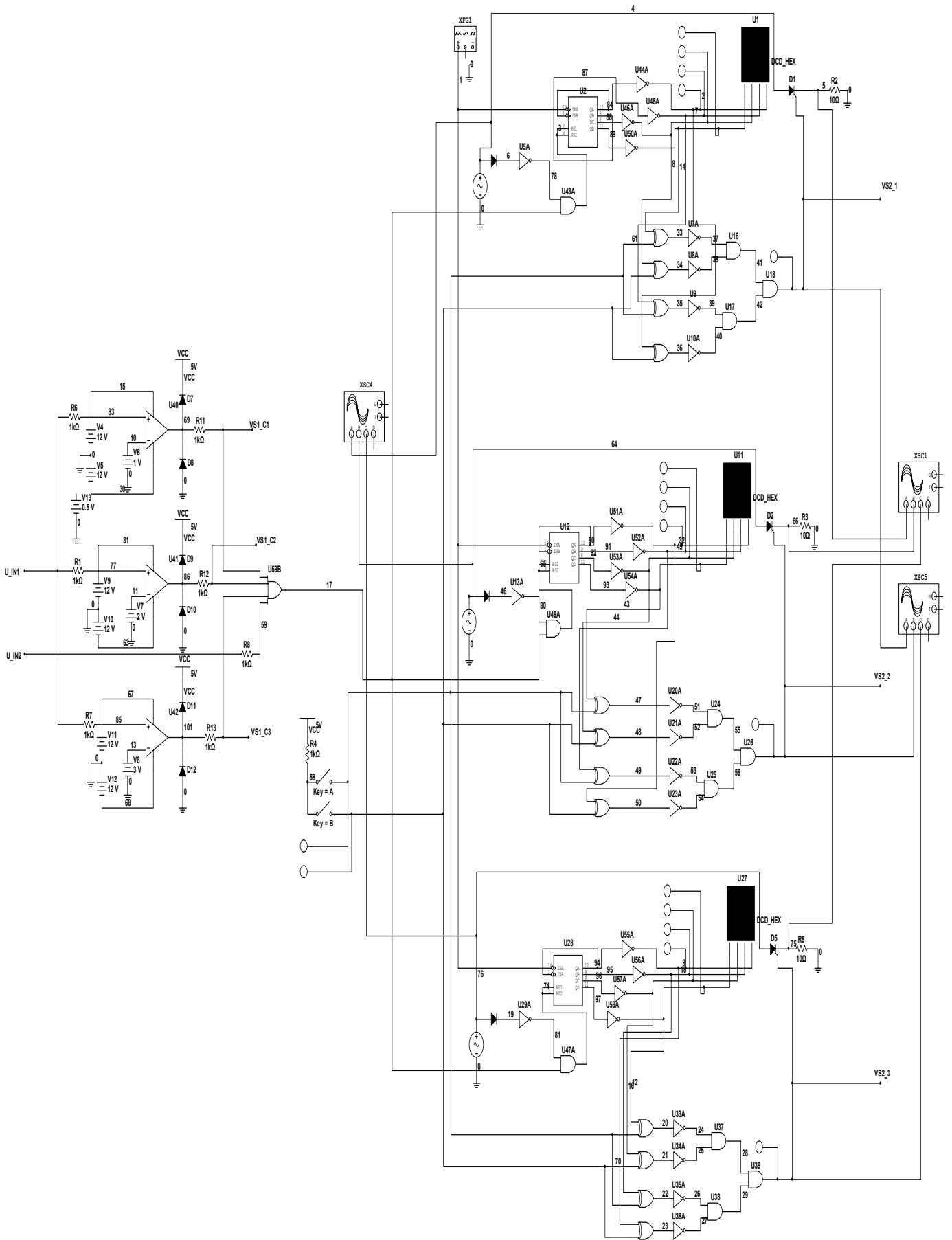


Рис. 12 Цифровая система управления РИРМ

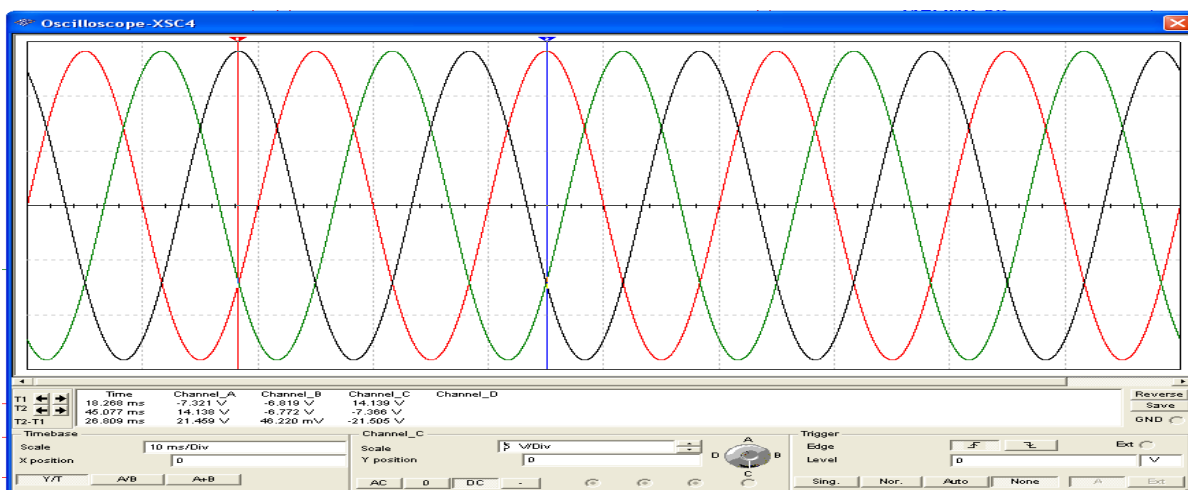


Рис. 13. Входной сигнал системы управления ($U=10\text{ V}$)

При помощи ключей (key_A, key_B), рис. 12, задается код управления 10 (в десятичной системе 2), что соответствует углу управления:

$$\frac{180}{16} \cdot (16 - N) = \frac{180^0}{16} \cdot 6 = 67.5^{\circ},$$

где N – десятичное число, соответствующее 4-х разрядному коду управления.

На положительной полуволне питающего напряжения вычитающий счетчик формирует опорный код. Схема сравнения поразрядно сравнивает опорный код с преобразованным 4-х разрядным кодом управления. В момент их равенства на выходе формируется импульс. На рис. 14 представлена осциллограмма управляющих импульсов силовых вентилей 3-х фазной системы. При этом импульсы, вырабатываемые для каждой из фаз, имеют одинаковую амплитуду.

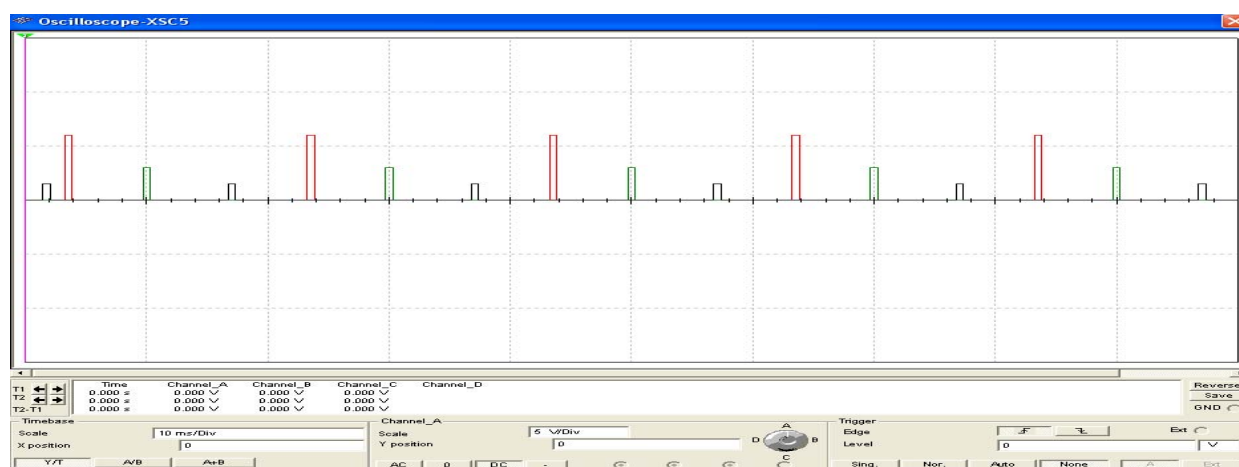


Рис. 14. Управляющие импульсы, соответствующие углу управления в 67.5^0 градусов (задающий двоичный цифровой код – 10)

Таким образом, получены 4 ступени регулирования (соответствует углу открытия тиристора VS2) от -25 квар до 0 квар при отсутствии конденсаторной установки; от 0 квар до 25 квар при подключении одной ступени конденсаторной

установки (С1); от 25 квар до 50 квар при подключении двух ступеней (С1, С2); от 50 квар до 75 квар при подключении трех конденсаторных установках (С1, С2 и С3).

При таком алгоритме включений реакторов и конденсаторов получено 16-ти ступенчатое регулирование, что можно считать практически плавным регулированием реактивной мощности нагрузки в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Разработанная ЦСУ РИРМ предполагает, что их переключение в сторону увеличения реактивной мощности должно происходить, если генератор импульса (эталонной частоты) даст сигнал в (-1) В, и соответственно уменьшение реактивной мощности будет происходить при сигнале $(+1)$ В.

Таким образом, в ЦСУ осуществляется регулирование напряжения на ± 1 %.

В четвертой главе представлены результаты исследования характеристик работы РИРМ. На рис. 15. приведены осциллограммы линейных напряжений, фазных и линейных токов при подключении к сети только блока модели регулируемой части РИРМ (рис. 8). Из осциллограммы видно, что в первый момент времени происходит задержка включения тиристоров, а при изменении угла открывания тиристоров изменяется форма тока, что свидетельствует о появлении высших гармоник. Результаты анализа показали, что наличие высших гармоник в линейных токах не превышает допустимых значений по ГОСТ 13109-97 в самых неблагоприятных режимах. Следует отметить, что высшие гармоники при идеальном включении тиристоров отсутствуют.

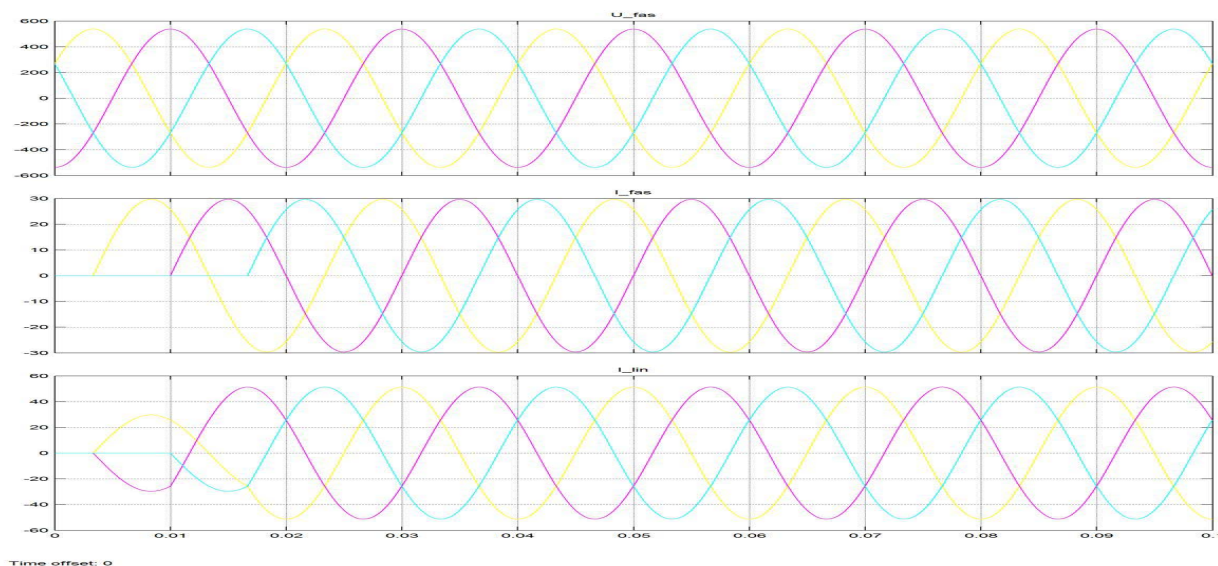


Рис. 15 Осциллограммы линейных напряжений, фазных и линейных токов при подключении к сети блока модели регулируемой части РИРМ

На рис. 16 представлены осциллограммы тех же параметров, но при задержке включения тиристоров на одну миллисекунду с целью проверки отсутствия гармоник.

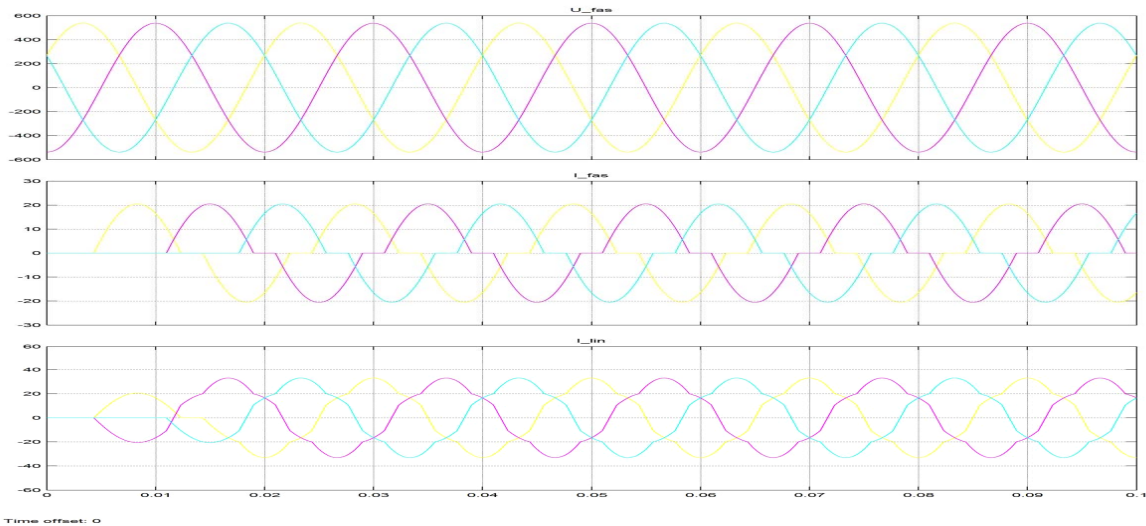


Рис. 16 Осциллограммы фазных напряжений, фазных и линейных токов при задержках включения тиристоров и появлении высших гармоник

Из рис. 17 следует, что при включении тиристора через 0.002 с высшая гармоника в сети промышленных предприятий отсутствует.

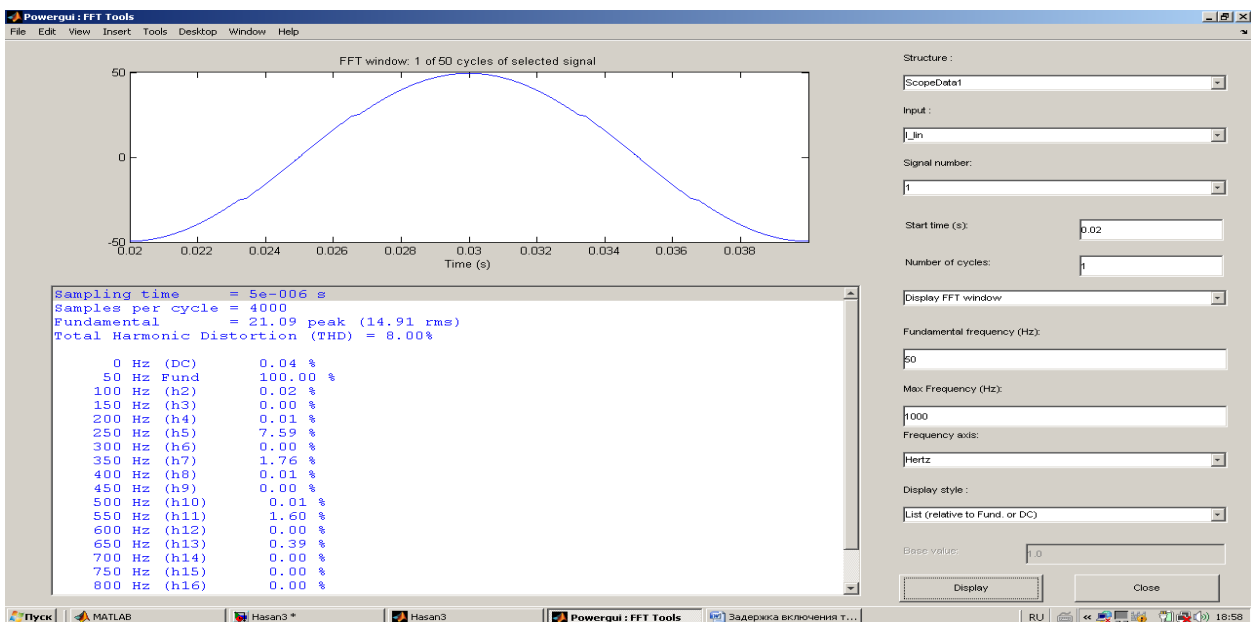


Рис. 17 Зависимость тока от времени включения тиристоров при $t = 0.002$ с

Результаты исследований показали, что при подключении всех блоков модели РИРМ гармоники в сети отсутствуют, но в первый момент времени возможны резонансы токов и напряжений. С целью их исключения необходимо подобрать параметры токоограничивающих реакторов L_a , L_b , L_c . Для этого целью в модели использован блок Impedance Measurement, позволяющий изменять параметры модели рис. 18.

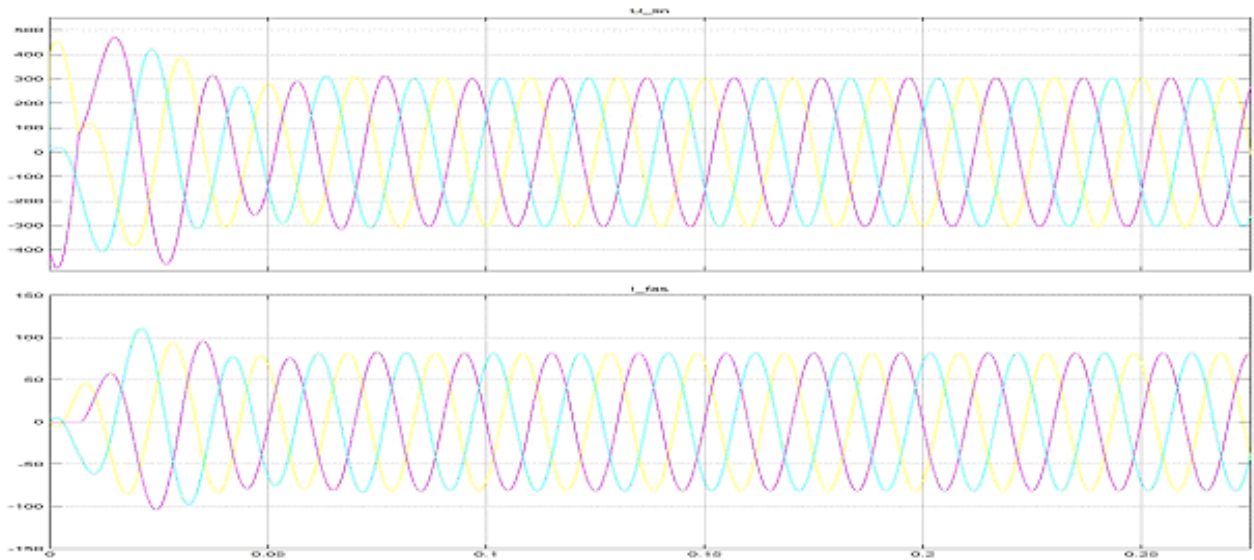


Рис. 18. Осциллограммы линейных напряжений и токов модели РИРМ

Работа модели РИРМ была проверена на переменном графике нагрузки одного из участков систем электроснабжения промышленного предприятия (ОАО «Автокран», г. Иваново).

Анализ графика нагрузки, приведенного на рис. 19, показал, что реактивная мощность носит индуктивный характер. Величина потребляемой реактивной мощности за одну смену изменялась от 7 до 29,6 квар.

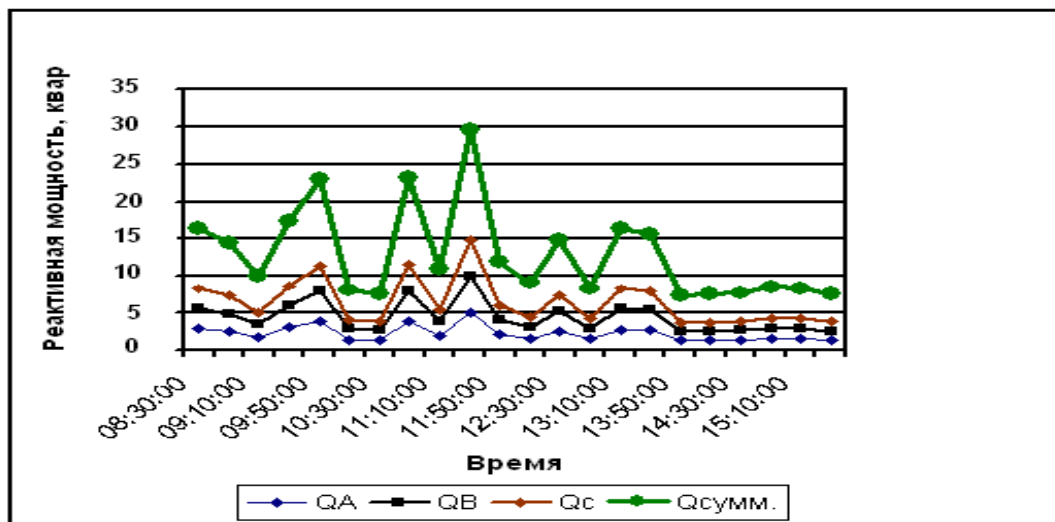


Рис. 19. График узла нагрузки до компенсации реактивной мощности

При подключении к сети РИРМ мощностью 75 квар на напряжение 380 В потребление реактивной мощности уменьшилось на 25 квар при максимальной нагрузке 29,6 квар, что соответствует автоматическому подключению четырех ступеней ИРМ, каждая из которых 6,25 квар. При минимальной нагрузке (7,434 квар) автоматически подключается лишь одна ступень, это следует из графика

рис. 20. Результаты исследования показали, что параметры РИРМ выбраны правильно.

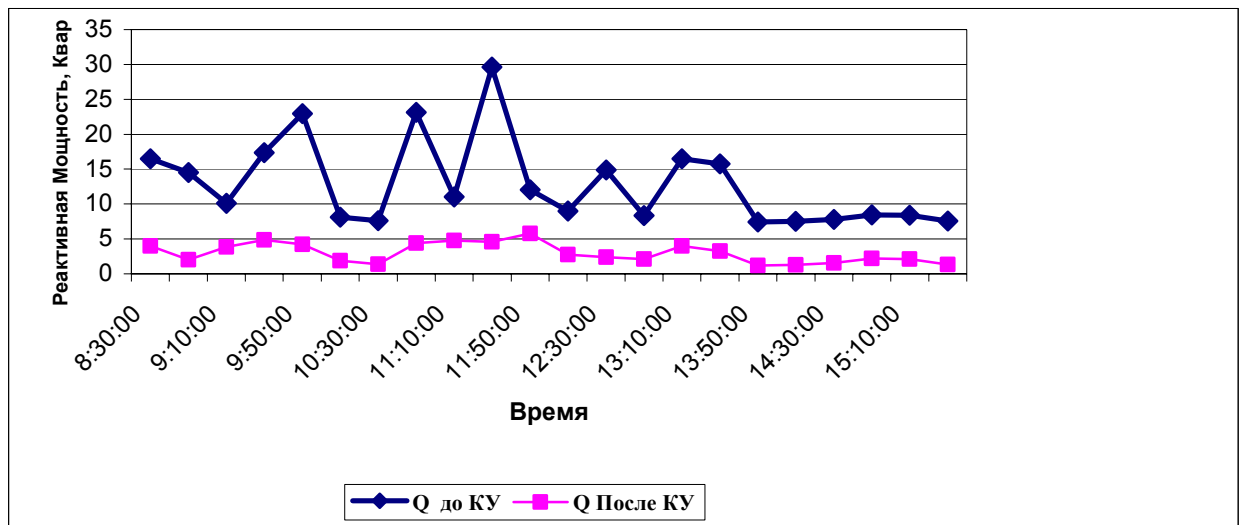


Рис. 20. График узла нагрузки до и после установки источника реактивной мощности

Следует отметить, что в процессе моделирования блок ЦСУ не был смоделирован вместе с источником реактивной мощности, так как ЦСУ моделировалась в программе NI Multisim 10, не совместимой с комплексом MATLAB и Simulink. Поэтому, для достоверности работы РИРМ исследовалась каждая точка нагрузки в отдельности в программе MATLAB и Simulink без использования ее системы управления. То есть достоверность работы модели РИРМ подтверждается изменением реактивной мощности нагрузки только для одного принятого ее значения (рис. 21).

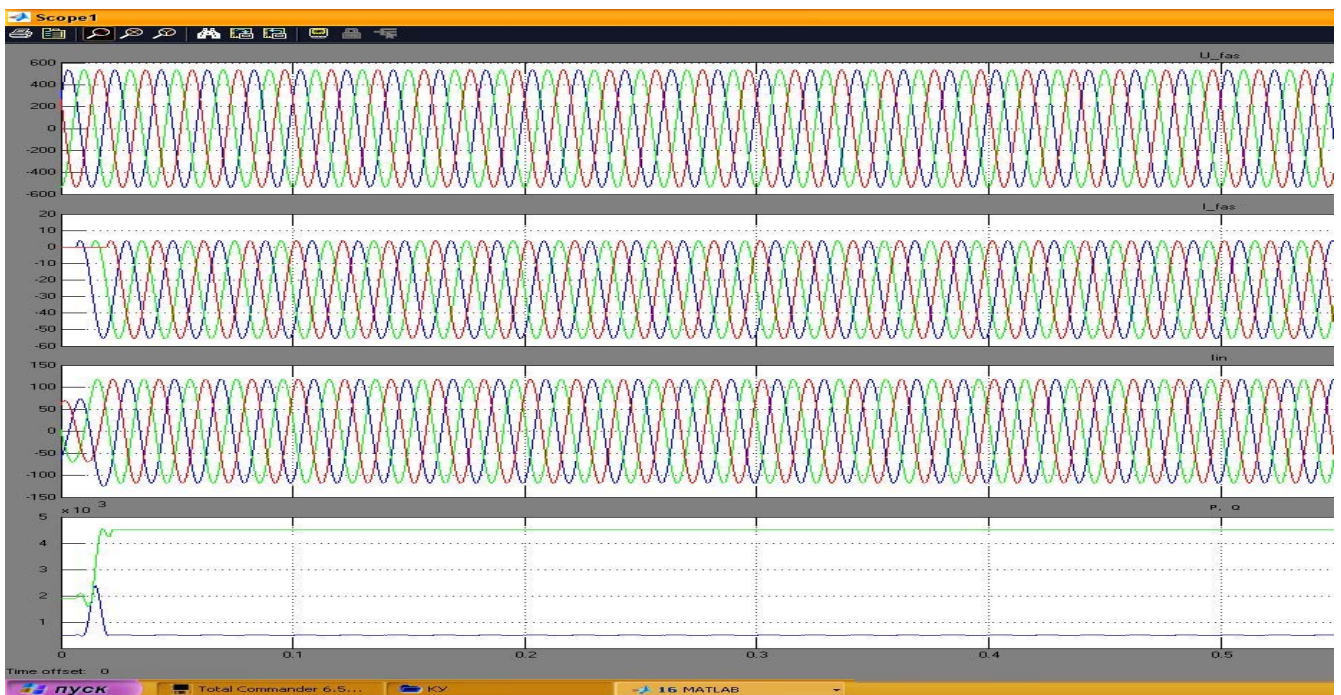


Рис. 21 Графики изменения напряжений, токов и реактивной мощности при подключении одной ступени источника реактивной мощности

Основные выводы и результаты

1. Показано, что в настоящее время в Ираке идет интенсивное восстановление и строительство промышленных предприятий с использованием современных эффективных технологий и нового электрооборудования. Одними из главных требований к системам электроснабжения промышленных предприятий являются:
 - обеспечение качества электроэнергии потребителям;
 - экономичность (снижение потерь мощности и электроэнергии).
 - правильный выбор типа, мощности, место установки и режима работы источников реактивной мощности в сети промышленных предприятия позволит указанные требования.
2. Исследованы схемы различных источников реактивной мощности для систем электроснабжения промышленных предприятий Ирака и выбрана схема регулируемого источника реактивной мощности, позволяющего осуществлять плавное регулирование реактивной мощности нагрузки и обладающего быстроедействием.
3. Разработана математическая модель регулируемого источника реактивной мощности, основанная на использовании метода переменных состояний.
4. Разработана модель регулируемого источника реактивной мощности с использованием средств Matlab, Simulink, и toolbox Sim Power Systems, позволяющая проводить исследования его режимов работы в системах электроснабжения промышленных предприятий с переменной нагрузкой.
5. Разработаны структурная схема и модель цифровой системы управления источника реактивной мощности, позволяющие обеспечить быстроедействие компенсации реактивной мощности изменяющейся нагрузки в системе электроснабжения промышленного предприятия.
6. Исследованы режимы работы отдельных блоков модели регулируемого источника реактивной мощности. Выявлены особенности электромагнитных явления, возникающих при коммутации тиристоров (генерация высших гармоник, резонансные явления в электрической сети), позволяющие настроить модель в соответствии с требованиями к качеству электрической энергии.
7. Исследованы различные режимы работы источника реактивной мощности на полученной модели с целью настройки цифровой системы управления при различных изменяющихся графиках нагрузок промышленных потребителей электрической энергии.
8. Достоверность работы модели регулируемого источника реактивной мощности подтверждена путем имитационного моделирования реального графика нагрузки в системе Matlab, Simulink, toolbox Sim Power Systems, а так же в программе NI Multisim 10.
9. Разработанные компьютерные модели регулируемого источника реактивной мощности с цифровыми системами управления для систем электроснабжения промышленных предприятий могут быть использованы в организациях, занимающихся разработкой регулируемых источников реактивной мощности с целью исследования их характеристик.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Хасан Альван Хуссаин.** Разработка цифровой системы управления вентилями преобразователями для компенсации реактивной мощности в цеховых сетях промышленных предприятий республики Ирак / А.И. Терехов, Хасан Альван Хуссаин // Вестник ИГЭУ. Вып. 5 Иваново: ИГЭУ. 2005. С. 104.
2. **Хасан Альван Хуссаин.** Математическая модель статического источника реактивной мощности для промышленных предприятий Ирака / В.Д. Лебедев, Хасан Альван Хуссаин // Вестник ИГЭУ. Вып. 6 Иваново: ИГЭУ. 2005. С. 84.
3. **Хасан Альван Хуссаин.** Новый регулируемый источник реактивной мощности для цеховых сетей промышленных предприятий / О.А. Бушуева, А.Ю. Мурзин, Хасан Альван Хуссаин // Вестник ИГЭУ. Вып. 2 Иваново: ИГЭУ. 2007. С. 81.

Публикации в других изданиях

1. **Хасан Альван Хуссаин.** Компенсация реактивной мощности в цеховых сетях промышленных предприятия с применением новых технических средств / О.А. Бушуева, А.Ю. Мурзин, Хасан Альван Хуссаин // Тез. докл. XIII-й международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». Иваново: ИГЭУ, 2006. С. 33.
2. **Хасан Альван Хуссаин.** Компенсация реактивной мощности в сетях промышленных предприятий Ирака / А.Ю. Мурзин, О.А. Бушуева, Хасан Альван Хуссаин // Тез. докл. XIII международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М: МЭИ, 2006. Том 2. С. 396.
3. **Хасан Альван Хуссаин.** Компенсация реактивной мощности в сетях промышленных предприятий республики Ирак / А.Ю. Мурзин, О.А. Бушуева, Хасан Альван Хуссаин // Тез. докл. международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». XIV-й Бенардосовские чтения. Иваново: ИГЭУ, 2007. Том 1. С. 62.
4. **Хасан Альван Хуссаин.** Компенсация реактивной мощности в сетях промышленных предприятий республики Ирак / А.Ю. Мурзин, О.А. Бушуева, Хасан Альван Хуссаин // Тез. докл. международной научной конференции «Тинчутинские чтения». Казань: КГЭУ, 2007. С. 30.
5. **Хасан Альван Хуссаин.** Совершенствование схемы и разработка модели регулируемого источника реактивной мощности для цеховых сетей промышленных предприятий / О.А. Бушуева, Хасан Альван Хуссаин // Тез. докл. международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития энерготехнологии». XV Бенардосовские чтения. Иваново: ИГЭУ, 2009. С. 33.