

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи



Стулов Александр Дмитриевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ПРЕДПРИЯТИЯ С СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Котенев А.В.

Самара 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. АНАЛИЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	16
1.1. Основные типы устройств компенсации реактивной мощности	16
1.2. Системы управления коэффициентом мощности с конденсаторными установками	17
1.3. Системы управления коэффициентом реактивной мощности группы электроприемников с синхронными машинами	24
1.4. Выводы по первой главе	30
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ	31
2.1. Функциональная схема электротехнического комплекса насосных станций и её составляющие	31
2.2. Управление коэффициентом реактивной мощности электротехнического комплекса предприятия	34
2.3. Математическая модель трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности	38
2.3.1. Уравнения потерь активной и реактивной мощности в трансформаторе	38
2.3.2. Определение параметров трансформаторов	41
2.3.3. Суточные графики коэффициента реактивной мощности без регулирования	42
2.4. Управление коэффициентом реактивной мощности на стороне низшего напряжения трансформаторной подстанции	45
2.4.1. Математическая модель САУ КРМ на стороне НН.....	45
2.4.2. Суточные графики коэффициента реактивной мощности с регулированием на стороне низшего напряжения трансформатора	48

2.5. Управление коэффициентом реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции.....	51
2.5.1. Математическая модель САУ КРМ на стороне ВН	51
2.5.2. Суточные графики коэффициента реактивной мощности при регулировании на стороне высшего напряжения	54
2.6. Система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности всего предприятия	56
2.6.1. Математическая модель САУ КРМ при регулировании на стороне низшего и высшего напряжения трансформаторной подстанции	56
2.6.2. Математическая модель САУ КРМ всего предприятия	58
2.7. Выводы второй по главе.....	60
3. ДИНАМИКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	63
3.1. Математическая модель системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности ЭТК в часы малых и больших суточных нагрузок	64
3.1.1. Математическая модель синхронного двигателя для режима малых отклонений	64
3.1.2. Определение параметров синхронного двигателя	67
3.1.3. Переходные процессы синхронного двигателя при регулировании реактивной мощности	71
3.1.4. Обобщенная математическая модель электротехнического комплекса с синхронным электроприводом	74
3.1.5. Переходные процессы в ЭТК с синхронным электроприводом	77
3.2. Определение параметров схемы замещения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при отсутствии информации	78
3.2.1. Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя по неполным данным	78

3.2.2. Определение активной и реактивной мощности трехфазного асинхронного двигателя при пуске и изменении нагрузки на валу	85
3.2.3. Обобщенная математическая модель ЭТК предприятия с синхронным электроприводом с учетом возмущающего воздействия асинхронного двигателя	88
3.3. Системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности ЭТК предприятия и их динамические характеристики	93
3.3.1. Одноконтурная система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности	93
3.3.2. Синхронный электропривод с обратной связью по току возбуждения .	99
3.3.3. Двухконтурная система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности	107
3.4. Выводы по третьей главе.....	114
4. РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭТК НСМ	116
4.1. Техническая реализация САУ КРМ ЭТК НСМ	116
4.2. Экономическое обоснование САУ КРМ ЭТК с программным управлением	121
4.3. Экспериментальная установка и исследование трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности	124
4.4. Исследование САУ КРМ ЭТК в системе моделирования энергосистем PSCAD	128
4.5. Выводы по четвертой главе	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	141
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	142
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ АО «ГК «ЭЛЕКТРОЦИТ» - ТМ САМАРА».....	162

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО ПКФ «МК-АЛЪЯНС»	163
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ФГБОУ ВО «СамГТУ»	164

ВВЕДЕНИЕ

Задача оптимизации потокораспределения реактивной мощности в энергосистемах является важной, так как влияет на сокращение потерь активной мощности в сетях. Она решается путем рационального распределения реактивных нагрузок с учетом фактических нагрузок потребителей и доступного запаса реактивной мощности источников питания.

Отличительной особенностью энергосистем является единство технологического процесса производства, транспорта и распределения электрической энергии. Следовательно, имеется режимная связанность электроустановок потребителей электрической энергии с остальными электроэнергетическими объектами энергосистемы. Данное обстоятельство делает естественным технологическое участие потребителей в решении задачи рационального функционирования энергосистем. В условиях централизованного оперативно-диспетчерского управления энергосистемами поддержание оптимального баланса потребляемых активной и реактивной мощностей технически реализуемо.

Передача реактивной мощности на дальние расстояния с целью повышения коэффициента мощности потребителей экономически нецелесообразна. Во-первых, из-за неприемлемо высокого уровня потерь электроэнергии. Во-вторых, из-за невозможности в большинстве случаев функционирования конкурентного рынка реактивной мощности в условиях либерализованной электроэнергетики, по причине высоких потерь реактивной мощности в элементах энергосистемы. Вовлеченность потребителей электрической энергии в процесс поддержания оптимального баланса потребляемой активной и реактивной мощностей обеспечивается путем тарифного регулирования в отношении режима потребляемой ими электрической энергии на основании значения коэффициента реактивной мощности. Он определяется как отношение реактивной мощности к активной.

С этой целью при заключении договоров потребителей с сетевыми организациями об оказании услуг по передаче электрической энергии для каждой точки поставки электроэнергии устанавливается максимальное значение коэффициента реактивной мощности, потребляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети и минимальное значение коэффициента реактивной мощности, генерируемой в часы малых суточных нагрузок. По соглашению с сетевой организацией потребитель дополнительно может участвовать в регулировании реактивной мощности в целях обеспечения оптимального режима работы электрической сети, что достигается путем предоставления на возмездной основе своих ресурсов источников реактивной мощности. Для этого в договоре об оказании услуг по передаче электроэнергии в отношении указанных точек поставки дополнительно определяются часы больших и малых электрических нагрузок, периоды участия потребителя в регулировании реактивной мощности и устанавливаются диапазоны требуемых значений коэффициентов реактивной мощности. В случае нарушения установленного договорными обязательствами режима энергопотребления реактивной мощности предусматривается ответственность потребителя в виде увеличения тарифа на услуги по передаче электроэнергии. В периоды участия в регулировании реактивной мощности для потребителя применяется понижающий коэффициент в отношении оплаты услуг по передаче электрической энергии. Значения повышающих и понижающих коэффициентов определяются по методике, утвержденной Федеральной службой по тарифам РФ [35].

Таким образом потребитель электрической энергии имеет возможность ощутимо сократить затраты на электроснабжение путем обеспечения заданного суточного режима потребления реактивной мощности. Для решения этой задачи он, как правило, располагает собственными источниками реактивной мощности в виде конденсаторных установок компенсации реактивной мощности и технологических установок с синхронными двигателями. Резервы реактивной мощности устройств компенсации могут быть использованы для обеспечения режимов потребления или генерации реактивной мощности, оговоренных

договором с сетевой организацией об оказании услуг по передаче электрической энергии. По причине существенных колебаний суточного объема потребления электроэнергии и изменения коэффициента реактивной мощности, а также в силу необходимости выполнения своих договорных обязательств, связанных с участием в регулировании реактивной мощности, потребителю необходимо в течение суток несколько раз изменять режим работы источников реактивной мощности. Расчет режима работы источников реактивной мощности осложняется множеством факторов. Этими факторами являются резкие колебания нагрузки, вызванные особенностями технологического процесса, изменение режима работы системы электроснабжения по причине плановых и аварийных отключений отдельных мощных электроустановок или участков электрической сети, сезонные изменения коэффициента реактивной мощности.

Учитывая вышеуказанные обстоятельства, можно с высокой степенью вероятности заключить, что обеспечение процесса надежного регулирования коэффициента реактивной мощности исключительно силами обслуживающего персонала без применения специальных технических средств автоматического управления невозможно. Таким образом, создание системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения потребителя в целях уменьшения затрат на потребляемую электроэнергию является актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы

Разработке моделей и алгоритмов работы управляемых конденсаторных установок посвящено большое количество работ. Среди них значительное место занимают работы: Ильяшова В.П., Красника В.В., Маклакова А. С., Николаева А. А., Хисматуллина А. С., Еремина М. Ю., Волгина М. Е., Ocoleanu D. С., Rechberger K., Coefler H., Krishnaram K., Kumar D., Zhu Y., Lin Q., Yu H., Fu Z., Ma R., Fan H., Ma Y., Yu C., Lambe S., Karande K., Wagle R., Ye L., Kosaraju K.

Математическому моделированию, алгоритмизации, разработке систем управления синхронными электрическими машинами посвящены работы: Юрганова А.А., Груздева А.И., Петелина Д.П., Рысева П. В., Малькова С. С.,

Шульги К. С., Гончарука А. Ю., Нурматова О. Е., Лашенова М.Б., Пилюгина Г.А., Angayar K. S., Kumar K., Arumugam S., Köppe H., Zhou Yu., Li Z., Farkhadov Z.

Обозначенные выше проблемы в данных работах рассмотрены без учета возможности использования обратных связей по мощности нагрузки и коэффициенту реактивной мощности, а также без учета влияния на величину коэффициента реактивной мощности параметров асинхронных двигателей и конденсаторных установок. Асинхронные двигатели характеризуются большими пусковыми токами, способными резко изменить коэффициент реактивной мощности системы электроснабжения. Установленные конденсаторные батареи на стороне высокого напряжения обычно не имеют возможности регулирования. Конденсаторные батареи на стороне низкого напряжения работают с небольшой задержкой для увеличения срока службы коммутирующей аппаратуры. Регулированию коэффициента реактивной мощности за счет управления возбуждением синхронного двигателя при разгоне мощных асинхронных двигателей уделено недостаточное внимание. Указанные проблемы позволяют сформулировать цель работы и задачи научных исследований.

Объект исследования – электротехнический комплекс предприятия с синхронным электроприводом, силовыми трансформаторами, асинхронными двигателями большой мощности и регулируемые конденсаторными установками.

Предмет исследования - система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности, методы настройки регуляторов на оптимум.

Цель работы - улучшение управления коэффициентом реактивной мощности предприятия с синхронным электроприводом для поддержания баланса реактивной мощности, уменьшения тарифа на электрическую энергию и повышения конкурентоспособности производства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель стационарного режима работы ЭТК предприятия, включающего трансформаторы 35/6, 6/0,4 кВ и систему автоматического регулирования коэффициентом реактивной мощности.

2. Разработать математическую модель динамических процессов в электротехническом комплексе предприятия, содержащем мощные асинхронные двигатели с переменной нагрузкой, являющиеся потребителями реактивной мощности, и синхронные электроприводы в качестве источника реактивной мощности.

3. Синтезировать систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности электротехнического комплекса предприятия при использовании синхронного двигателя в качестве источника реактивной мощности, для обеспечения качественного регулирования коэффициента реактивной мощности.

4. Определить эффективный вариант системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности с одно- и двухконтурной структурами и подчиненным контуром регулирования тока возбуждения синхронной машины.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель электротехнического комплекса предприятия, позволяющая управлять в динамике коэффициентом реактивной мощности и определять потери активной и реактивной мощности в трансформаторе и линиях предприятия.

2. Установлено значительное влияние потерь в трансформаторе ГПП на значение коэффициента реактивной мощности предприятия, требующее постоянного контроля с целью обеспечения его заданного значения на шинах ГПП.

3. Разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности на шинах главной понизительной подстанции, отличающийся учетом изменения потерь активной и реактивной мощности в силовых трансформаторах.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Осуществлен синтез системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности посредством регулирования напряжения возбуждения синхронного электродвигателя.
2. Определены настройки регуляторов системы автоматического управления, позволяющие уменьшить величину коэффициента реактивной мощности и стоимость электроэнергии для промышленного предприятия.
3. Разработана методика расчета активной и реактивной мощности асинхронного двигателя, позволяющая определить их изменение при развороте двигателя, и осуществлять эффективную настройку релейных защит.
4. Результаты работы внедрены в практику приемосдаточных испытаний на АО «ГК «Электроцит» - ТМ Самара» (Акт внедрения АО «ГК «Электроцит» - ТМ Самара») и в практику проектирования и строительства объектов энергетики ООО ПКФ «МК – Альянс» (Акт внедрения ООО ПКФ «МК – Альянс»).

Методы исследований

В работе использованы методы теории электрических машин, теории автоматического управления, электрического привода и методы компьютерного моделирования, реализованные в программных комплексах MATLAB Simulink и PSCAD.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель электротехнического комплекса предприятия, позволяющая управлять коэффициентом реактивной мощности и определять потери активной и реактивной мощности в элементах схемы.
2. Одно- и двухконтурная системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности электротехнического комплекса предприятия с синхронным электроприводом, позволяющие соблюдать предельные значения коэффициента реактивной мощности.
3. Определены настройки регуляторов системы автоматического управления, позволяющие уменьшить величину коэффициента реактивной мощности и стоимость электроэнергии для промышленного предприятия.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует пунктам: п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Степень достоверности

Достоверность результатов исследования обеспечивалась путем использования известных и проверенных математических методов с обоснованными допущениями, применением поверенных и сертифицированных приборов при проведении экспериментальных исследований, а также сравнением полученных в работе результатов с данными других авторов, занимающихся решением аналогичных задач. Вычислительные эксперименты на полученных моделях проводились с использованием программного обеспечения MATLAB и PSCAD.

Апробация результатов

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Электротехнические комплексы и системы» (UralCon-2020) (Челябинск, 2020), «Электротехнические комплексы и системы» (UralCon-2021) (Челябинск, 2021), «Электротехнические комплексы и системы» (UralCon-2023) (Челябинск, 2023), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика XXIX» (Москва, 2023), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика XXX» (Москва, 2024), а также на научных семинарах кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ общим объемом 5,4 п.л., в том числе 3 статьи индексируемые в базе данных Scopus, 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК РФ, в которых личный вклад автора составляет 3,4 п.л.

Личный вклад автора в диссертационное исследование

Состоит в разработке математической модели электротехнического комплекса, как объекта управления коэффициентом реактивной мощности; разработке методики расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным; синтезе системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности электротехнического комплекса предприятия; компьютерном моделировании электротехнического комплекса предприятия с синхронным электроприводом и различными структурами, анализе полученных результатов вычислительных экспериментов и проведении исследований, направленных на верификацию полученных результатов и моделей.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Основная часть диссертации изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка и 19 таблиц. Библиографический список содержит 152 наименования на 19 страницах.

Содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности работы, посвященной повышению эффективности работы системы автоматического управления (САУ) коэффициентом реактивной мощности (КРМ) электротехнического комплекса (ЭТК) предприятия с синхронными и асинхронными электродвигателями. Сформулированы цель работы и задачи исследования, а также показаны научная новизна и значимость полученных результатов при их практическом применении.

В первой главе проведен анализ публикаций, посвященных способам и системам автоматического управления конденсаторными установками, математическому описанию синхронных машин как объектов управления

реактивной мощностью, а также рассмотрены принципы работы автоматических регуляторов возбуждения этих машин. На основании обзора сформулирована проблема научных исследований диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрен стационарный режим работы электротехнического комплекса промышленного предприятия, как объекта управления коэффициентом реактивной мощности. Приведены уравнения для определения потерь мощности в трансформаторе, на основе которых разработана его математическая модель, отличающаяся учетом влияния постоянных и переменных потерь активной и реактивной мощности на величину коэффициента реактивной мощности. На основании математической модели трансформатора и уравнений, описывающих работу конденсаторной установки, синтезирована разомкнутая САУ величиной КРМ на стороне низшего напряжения трансформатора. Разработана модель стационарного режима работы электротехнического комплекса предприятия как объекта управления коэффициентом реактивной мощности. Методом компьютерного моделирования показана необходимость учета влияния постоянных и переменных потерь активной и реактивной мощности в трансформаторах на коэффициент реактивной мощности ЭТК.

Третья глава посвящена анализу динамики системы электроснабжения как объекта управления коэффициентом реактивной мощности. Приведена математическая модель синхронного двигателя как объекта управления током возбуждения и реактивной мощностью синхронной машины в режиме двигателя с постоянной нагрузкой, которая в отличие от существующих моделей, предполагает отсутствие существенных колебаний питающего напряжения. Разработана математическая модель, описывающая динамику электротехнического комплекса предприятия как объекта управления коэффициентом реактивной мощности, включающая в себя ранее полученные модели синхронного двигателя, САУ КРМ на стороне высшего напряжения трансформатора и САУ коэффициентом РМ на стороне низшего напряжения трансформатора. Рассмотрены вопросы определения параметров Т-образной

схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным. Получена математическая модель асинхронного двигателя как составного элемента САУ КРМ ЭТК. На основе математических моделей электротехнического комплекса предприятия, как объекта управления коэффициентом реактивной мощности, и асинхронного двигателя синтезирована модель электротехнического комплекса предприятия на стороне высшего напряжения трансформатора с выходной координатой в виде коэффициента реактивной мощности. Рассмотрен синтез регуляторов одно- и двухконтурной систем автоматического управления током возбуждения СД и коэффициентом реактивной мощности ЭТК.

В четвертой главе рассмотрена техническая реализация системы автоматического управления. Дано экономическое обоснование применения САУ КРМ ЭТК с синхронным электроприводом. Путем компьютерного моделирования в сертифицированном программном комплексе PSCAD верифицированы модели электротехнического комплекса предприятия как объекта управления величиной коэффициента реактивной мощности.

В заключении изложены основные выводы и результаты работы.

В приложении приведены акты внедрения результатов работы.

1. АНАЛИЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1. Основные типы устройств компенсации реактивной мощности

Проблеме разработки систем автоматического управления реактивной мощностью предприятий, оборудованных различными средствами компенсации реактивной мощности, посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. В них предлагается два типа систем автоматического управления реактивной мощностью. Первый тип (рис. 1.1) это системы управления, где в качестве устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ) используется конденсаторная установка с набором секций конденсаторов одинаковой либо разной реактивной мощности.

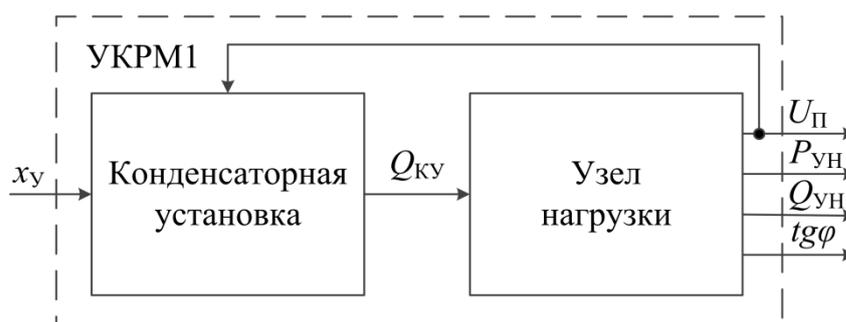


Рисунок 1.1 – Функциональная схема УКРМ с конденсаторной установкой, как объекта управления РМ

На схеме обозначено: $Q_{ку}$ – реактивная мощность, вырабатываемая конденсаторной установкой; $U_{п}$ – напряжение на сборных шинах подстанции; $P_{уН}$ – активная мощность, потребляемая подстанцией; $Q_{уН}$ – реактивная мощность, потребляемая подстанцией; $tg\varphi$ – коэффициент реактивной мощности.

Второй тип (рис. 1.2) это системы управления, где в качестве УКРМ используется синхронный двигатель, либо синхронный генератор.

Обозначения на схеме: U_y – напряжение управления АРВ; I_B – ток возбуждения синхронной машины; $Q_{см}$, $P_{см}$ – реактивная и активная мощности синхронной машины.

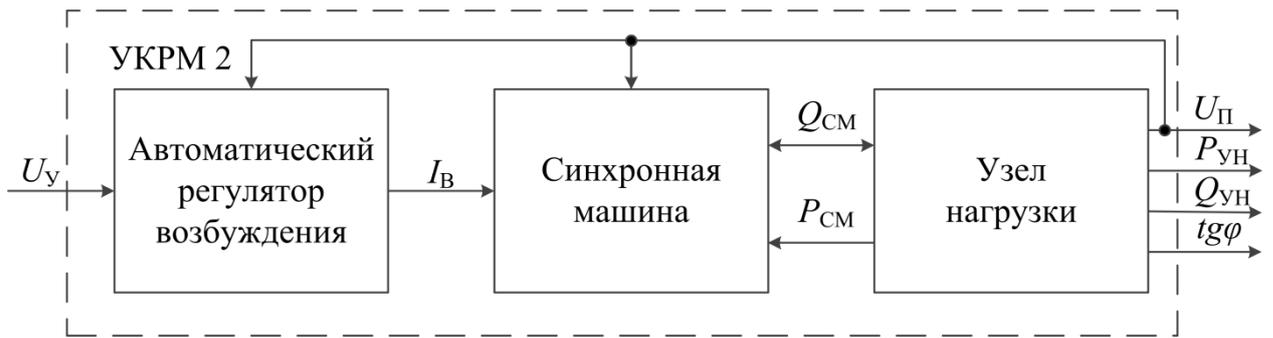


Рисунок 1.2 – Функциональная схема УКРМ с синхронным двигателем, либо синхронным генератором, как объекта управления РМ

Таким образом, системы управления коэффициентом мощности подразделяются на системы управления коэффициентом мощности посредством включения секций конденсаторов и системы управления коэффициентом мощности посредством плавного регулирования РМ синхронной машины.

1.2. Системы управления коэффициентом мощности с конденсаторными установками

Использование систем управления реактивной мощностью, основанных на использовании конденсаторных батарей, широко рассматривается в зарубежной и отечественной литературе. Этот способ регулирования имеет свои преимущества и недостатки.

В работах [6, 134] в качестве источника реактивной мощности предлагается использовать конденсаторы, установленные в источниках питания мощных электроприводов, что позволяет без дополнительных капитальных затрат компенсировать реактивную мощность. У этого способа есть ряд недостатков, в первую очередь связанных с ограничением диапазона регулирования, наличие дополнительных условий при использовании конденсаторов, установленных в источнике питания для компенсации реактивной мощности. Данный метод эффективен только при работе электропривода в режиме рекуперативного торможения, который длится непродолжительное время.

В работах [16, 60] предлагается использование статического тиристорного компенсатора реактивной мощности для борьбы с провалами и несимметрией напряжения, как следствием нарушения баланса мощностей, вместо регулирования коэффициента мощности. Данный метод благодаря использованию контроля напряжения позволяет повысить устойчивость энергосистемы к возмущающим воздействиям в виде подключения мощных нагрузок, но здесь не учитываются параметры электротехнического оборудования установленного в системе электроснабжения.

В работах [33, 52, 69, 137] предлагается использовать способ управления переключениями конденсаторных батарей, построенный на нечеткой логике с целью уменьшения влияния высших гармоник, продления срока службы конденсаторных батарей и компенсации реактивной мощности. Достоинством данного метода является продление срока службы батарей и использование гибких систем управления. Недостаток - использование громоздкого математического аппарата, что затрудняет его применение на практике в связи с ограниченными вычислительными мощностями контроллеров.

Работа [100] предлагает использовать статический тиристорный компенсатор с системой управления, работающей по методу синхронного обнаружения, что усложняет и удорожает эксплуатацию, предъявляет повышенные требования к квалификации обслуживающего персонала, является дорогостоящим решением проблемы компенсации реактивной мощности, а также не учитывает потери в элементах системы электроснабжения.

В [106, 107] предлагается в качестве системы управления использовать относительно недорогое оборудование, позволяющее компенсировать реактивную мощность. Однако не приводятся алгоритмы работы микроконтроллера, при управлении без контроля напряжения сети и высших гармоник уменьшается срок службы конденсаторных батарей. Данный метод характеризуется малым диапазоном регулирования и возможностью повреждения конденсаторов из-за перенапряжений и перегрева.

Системы и способы регулирования реактивной мощности, рассмотренные выше, являются аналогами одноступенчатых систем компенсации реактивной мощности, предложенных в [1, 17] (рис. 1.3). Схема управления этих систем работает в функции направления реактивной мощности.

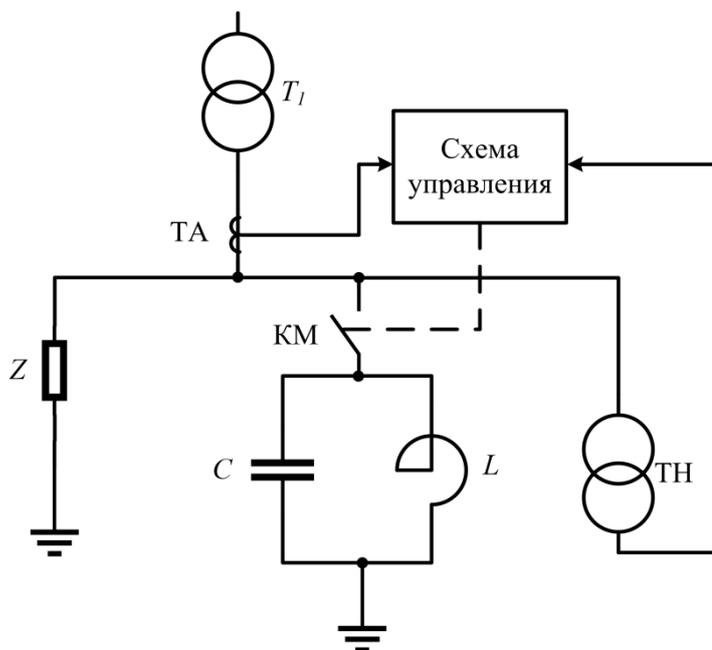


Рисунок 1.3 – Схема одноступенчатой конденсаторной установки с системой управления в функции направления реактивной мощности

На схеме: T_1 – силовой понижающий трансформатор; ТА – трансформатор тока; ТН – трансформатор напряжения; КМ – магнитный пускатель; C – конденсаторная батарея; L – дроссель; Z – полное сопротивление нагрузки, подключенной к шинам подстанции.

Представим данную схему в виде структуры системы автоматического управления в функции направления реактивной мощности (рис. 1.4)

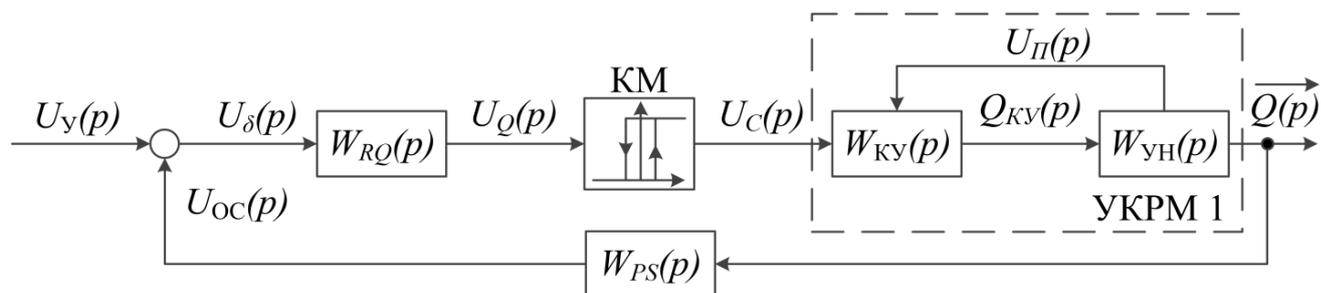


Рисунок 1.4 – Структурная схема одноступенчатой системы автоматического управления в функции направления реактивной мощности

На схеме: $W_{RQ}(p)$ – передаточная функция регулятора реактивной мощности; $W_{КУ}(p)$ – передаточная функция одноступенчатой конденсаторной установки; $W_{УН}(p)$ – передаточная функция узла нагрузки; КМ – нелинейный элемент; $U_q(p)$, $U_{oc}(p)$, $U_{\delta}(p)$, $U_c(p)$, $Q_{КУ}(p)$, $Q(p)$ – изображения соответствующих сигналов системы управления.

Достоинствами системы управления, представленной на рис. 1.4, являются простота технической реализации и наименьшая стоимость относительно других систем регулирования. Управление такой САУ может быть выполнено на одном реле направления мощности.

Недостатками такой системы управления являются низкая точность регулирования РМ, отсутствие возможности гибкой настройки. Также данная система не учитывает потери мощности в оборудовании, установленном до трансформатора тока ТА.

Также в указанных выше работах приводятся варианты многоступенчатых систем автоматического регулирования реактивной мощности в функции нескольких параметров (рис. 1.5).

На схеме обозначены: $КМ_1 \div КМ_n$ – пускорегулирующая аппаратура конденсаторных установок; $КУ_1 \div КУ_n$ – конденсаторные установки; $Рег_1 \div Рег_n$ – регуляторы соответствующих конденсаторных установок; ЦБУ – центральный блок управления; ТН – трансформатор напряжения; $ТТ_1 \div ТТ_n$ – трансформаторы тока.

Представим данную схему в виде структуры системы автоматического управления (рис. 1.6). На схеме обозначены: $W_{ЦБУ}(p)$, $W_{ТН}(p)$, $W_{рег1}(p) \div W_{регn}(p)$, $W_{КУ1}(p) \div W_{КУn}(p)$, $W_{УН}(p)$ – передаточные функции центрального блока управления, трансформатора напряжения, регуляторов, конденсаторных установок и узла нагрузки соответственно; $\cos\varphi(p)$, $U_{ТН}(p)$, $Q(p)$, $U_c(p)$, $U_y(p)$, $U_{Q1}(p) \div U_{Qn}(p)$, $U_{C1}(p) \div U_{Cn}(p)$, $Q_{КУ1}(p) \div Q_{КУn}(p)$, $Q_{КУ\Sigma}(p)$ – изображения сигнала задания, трансформатора напряжения, реактивной мощности, сигнала управления, реактивной мощности конденсаторных установок, причем величина общей

реактивной мощности всего УКРМ $Q_{KV\Sigma}(p)$ является суммой реактивных мощностей $Q_{KV1}(p) \div Q_{KVn}(p)$ каждой секции конденсаторной батареи.

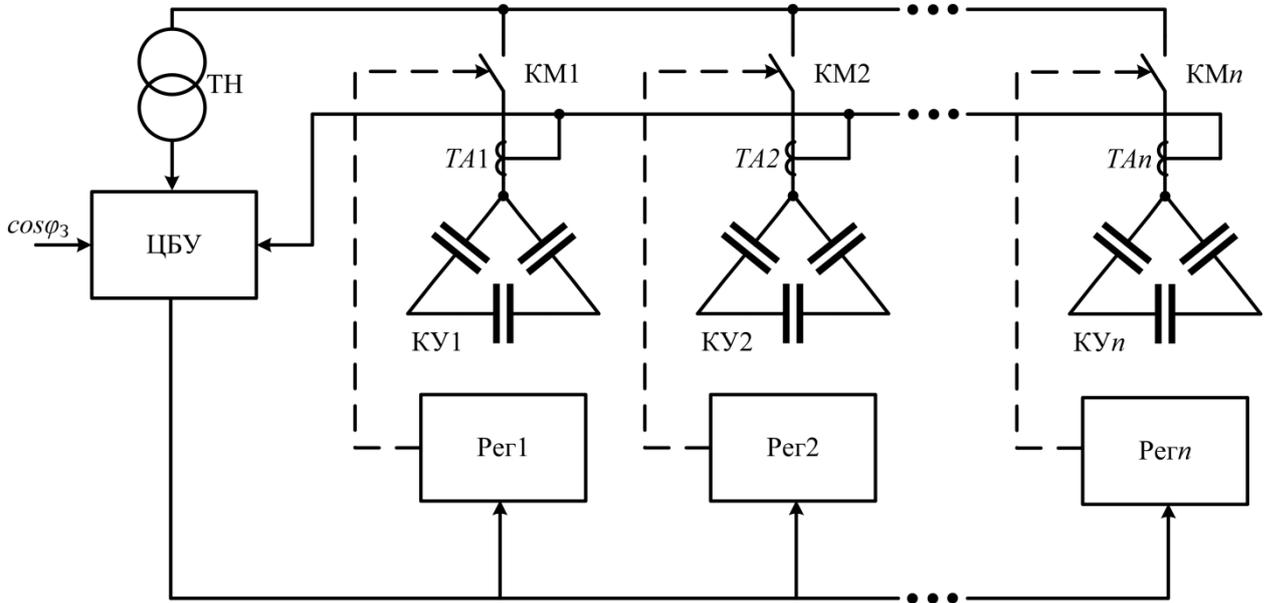


Рисунок 1.5 – Схема многоступенчатой системы автоматического управления коэффициентом мощности

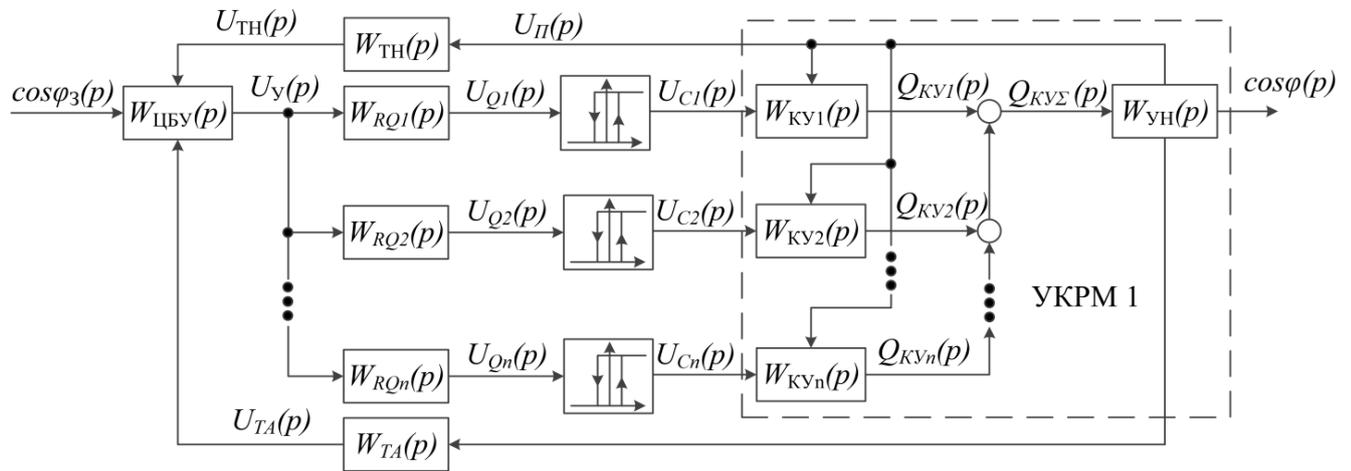


Рисунок 1.6 – Структурная схема многоступенчатой системы автоматического управления коэффициентом мощности

Показанная на рис. 1.5 и 1.6 система автоматического управления коэффициентом мощности является сложной в технической реализации и настройке за счет использования большого количества регуляторов и датчиков обратной связи. Кроме того, при коммутации отдельных секций конденсаторной установки происходят броски напряжения в сети.

Работа [121] предлагает использование в качестве системы автоматического управления конденсаторной установкой экспериментальный образец. Данный способ, несмотря на его дешевизну, имеет существенные недостатки из-за использования несертифицированного оборудования, которое не является промышленным и может нарушить работу системы электроснабжения предприятия, вывести из строя средства компенсации из-за неотработанных и непроверенных алгоритмов управления.

Система управления (рис. 1.7) [2, 63, 121] является упрощенным вариантом системы, представленной на рис. 1.5 и 1.6.

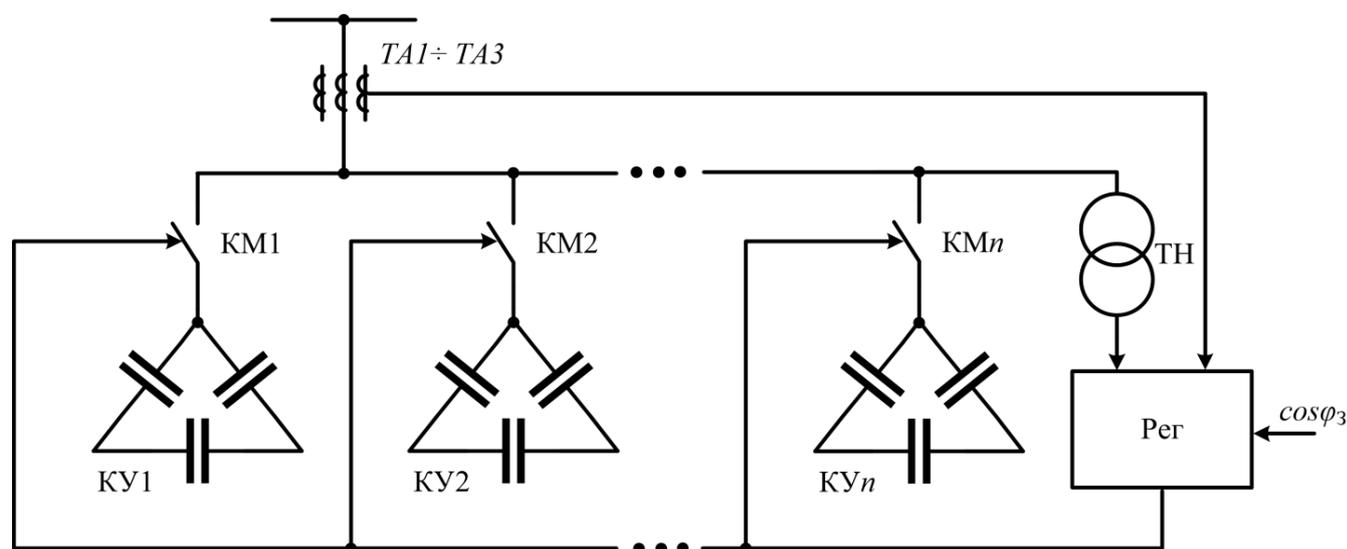


Рисунок 1.7 – Схема многоступенчатого регулирования коэффициента мощности

Обозначения: $KM_1 \div KM_n$ – пускорегулирующая аппаратура конденсаторной установки; $KY_1 \div KY_n$ – батареи конденсаторов; $Рег$ – регулятор конденсаторной установки; $ТН$ – трансформатор напряжения; $TA_1 \div TA_3$ – трансформаторы тока.

В виде структуры системы управления данная схема представлена на рис. 1.8. Обозначения: $W_{OC}(p)$, $W_{RQ}(p)$, $W_{KY1}(p) \div W_{KYn}(p)$, $W_{УН}(p)$ – передаточные функции датчика реактивной мощности, регулятора реактивной мощности, конденсаторных батарей и узла нагрузки; $\cos\varphi(p)$, $U_{ТН}(p)$, $Q(p)$, $U_C(p)$, $U_Y(p)$, U_Q , $U_{C1}(p) \div U_{Cn}(p)$, $Q_{KY1}(p) \div Q_{KYn}(p)$, $Q_{KY\Sigma}(p)$ – изображения сигнала задания, обратной связи, управления, реактивной мощности системы управления.

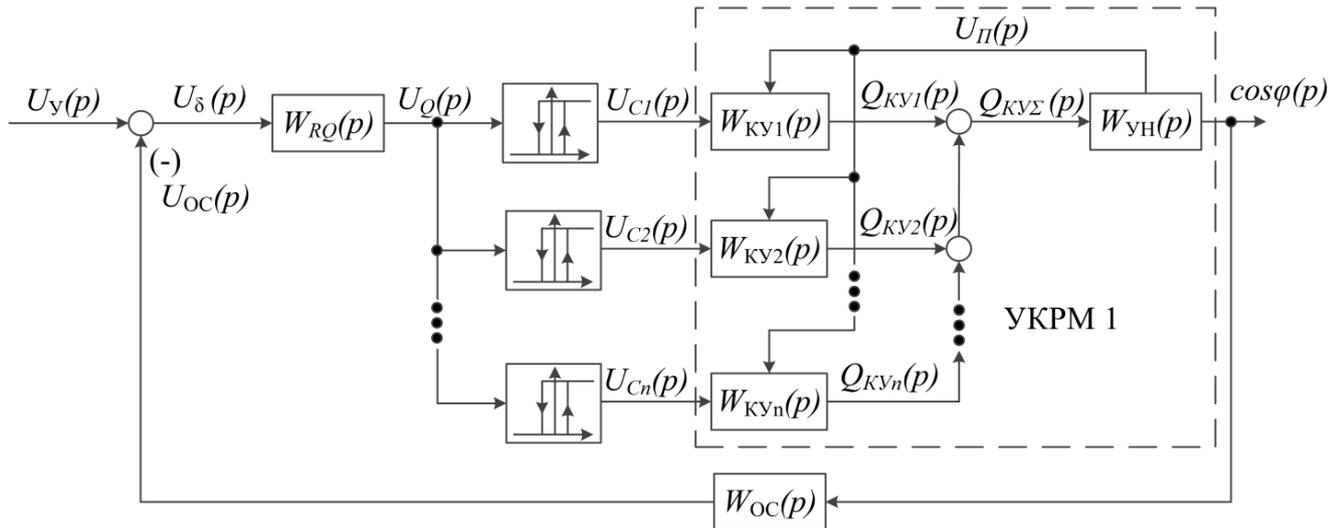


Рисунок 1.8 – Структурная схема многоступенчатой системы автоматического регулирования коэффициента мощности

Достоинствами систем автоматического управления, построенных с использованием конденсаторных установок, являются: относительная простота их технической реализации, дешевизна, по сравнению с другими способами компенсации реактивной мощности, возможность изменения мощности конденсаторной установки.

К основным недостаткам указанных систем автоматического управления можно отнести отсутствие возможности плавного изменения отдаваемой реактивной мощности, значительные колебания напряжения сети при включении батареи конденсаторов, большие пусковые токи при подключении батареи конденсаторов к сети и низкую точность регулирования реактивной мощности.

В описанных выше системах управления в качестве сигнала обратной связи использованы коэффициент и направление мощности. Также известны системы, обеспечивающие управление в функции напряжения на шинах подстанции по времени суток и току нагрузки.

1.3. Системы управления коэффициентом реактивной мощности группы электроприемников с синхронными машинами

В системах автоматического управления коэффициентом мощности промышленных предприятий успешно используются системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронных машин (СМ).

Работа [4] сравнивает системы АРВ синхронного двигателя, основанные на использовании обратных связей по току возбуждения и по реактивной мощности. Показаны преимущества и недостатки обоих видов управления синхронным двигателем. Недостатками такой системы управления реактивной мощностью можно считать использование обратной связи по реактивной мощности самого синхронного двигателя и отсутствие учета параметров других элементов системы электроснабжения.

В работе [27] в качестве управляющего воздействия при регулировании реактивной мощности предлагается использовать изменение напряжения статора за счет регулирования напряжения под нагрузкой. Достоинством предложенного метода является уменьшение потерь в магнитопроводе синхронного двигателя. К недостаткам следует отнести малый диапазон, высокую инерционность регулирования напряжения под нагрузкой. Изменение напряжения в системе электроснабжения после трансформатора с регулятором напряжения может привести к повреждению или уменьшению срока службы других элементов системы электроснабжения.

В работах [11, 48, 53, 56] рассмотрено использование алгоритмов управления возбуждением синхронных двигателей в функции минимума потерь активной мощности в питающих линиях. Достоинством данного подхода является учет потерь активной мощности в элементах электротехнического комплекса предприятия и использование потерь активной мощности в качестве сигнала обратной связи. К недостаткам относятся отсутствие учета потерь реактивной мощности в элементах электротехнического комплекса предприятия, контроля величин коэффициента мощности или коэффициента реактивной мощности. Это

затрудняет использование данной системы для регулирования реактивной мощности предприятия, так как потери в элементах ЭТК и питающей линии косвенно связаны с величиной реактивной мощности ЭТК.

В [70, 71, 75, 76] рассмотрена система АРВ сильного действия, замкнутая по двум производным: напряжения и частоты напряжения двигателя. Структурная схема данной системы представлена на рис. 1.9.

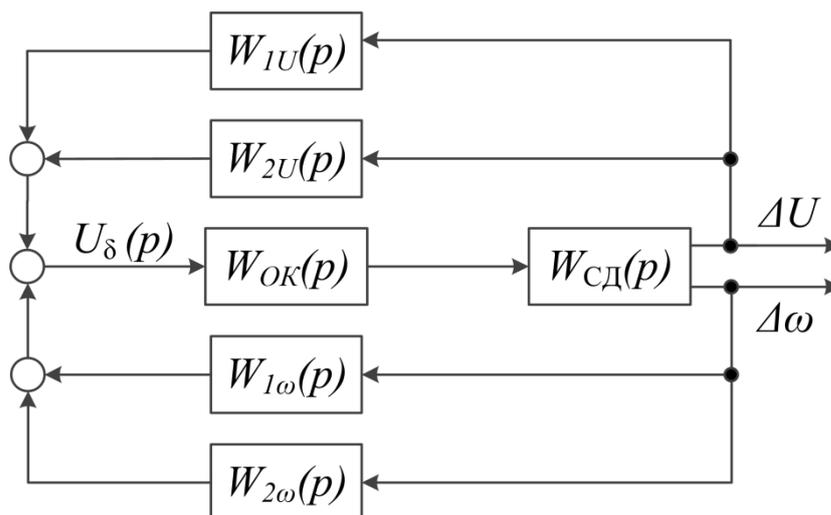


Рисунок 1.9 – Структурная схема системы АРВ по напряжению и частоте

Обозначения на схеме: $W_{сд}(p)$ – передаточная функция двигателя, $W_{ок}(p)$ – передаточная функция регулятора, $W_{1U}(p)$ - $W_{2\omega}(p)$ – передаточные функции датчиков обратной связи.

Достоинством системы, структурная схема которой приведена на рис. 1.9, является простота и изученность настройки систем управления параметрами синхронных машин. К недостатку можно отнести отсутствие учета характеристик элементов системы электроснабжения.

В работах [68, 108] предлагается использование регуляторов, основанных на алгоритмах нечеткой логики, где в качестве сигнала обратной связи используется направление реактивной мощности. Достоинством данной системы управления является использование гибких алгоритмов, основанных на нечеткой логике, позволяющих в процессе работы адаптировать систему управления к возмущающим воздействиям. Недостатком является использование сигнала обратной связи по направлению реактивной мощности, что дает невысокую

точность регулирования, так как у большинства промышленных предприятий наблюдается именно потребление, а не генерация реактивной мощности.

В [128] предложен алгоритм управления реактивной мощностью синхронного компенсатора, в основе которого лежит метод регрессионного анализа. Достоинством этого подхода является использование обратной связи по величине потребляемой реактивной мощности, что позволяет существенно снизить ее величину. Недостаток - использование сложного математического аппарата, что усложняет настройку системы управления.

В [2] представлена система АРВ СД настроенная на стабилизацию отдаваемой реактивной мощности или коэффициента реактивной мощности. Функциональная схема данной системы представлена на рис. 1.10.

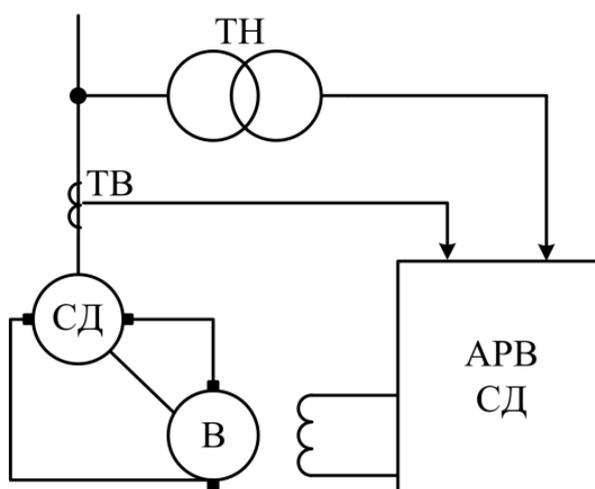


Рисунок 1.10 – Схема системы АРВ СМ с управлением реактивной мощностью или $\cos\phi$ СД

На схеме СД – синхронный двигатель, В – электромашинный возбудитель на базе генератора постоянного тока независимого возбуждения, ТН – измерительный трансформатор напряжения, ТВ – трансформатор тока, АРВ СД – автоматический регулятор возбуждения.

В виде структуры данная система представлена на рис 1.11 и 1.12.

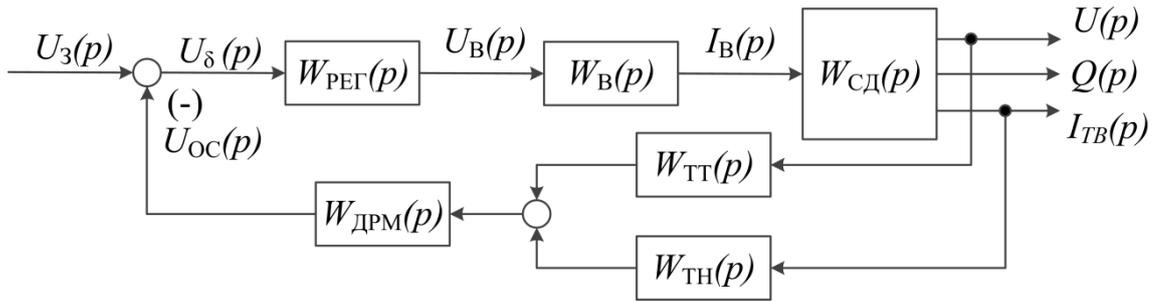


Рисунок 1.11 – система АРВ с управлением реактивной мощностью синхронного двигателя

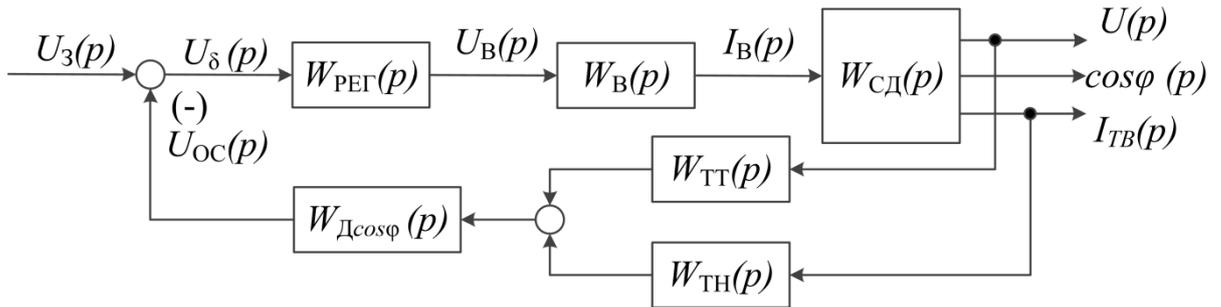


Рисунок 1.12 - система АРВ с управлением $\cos\varphi$ синхронного двигателя

На схемах $W_{сд}(p)$ – передаточная функция синхронного двигателя, $W_{в}(p)$ – передаточная функция электромашиного возбудителя, $W_{рег}(p)$ – передаточная функция регулятора, $W_{тт}(p)$ – передаточная функция измерительного трансформатора тока, $W_{тн}(p)$ – передаточная функция измерительного трансформатора напряжения, $W_{дрм}(p)$ – передаточная функция датчика реактивной мощности, $W_{д\cos\varphi}(p)$ – передаточная функция датчика коэффициента мощности, $U_3(p)$ – сигнал задания, $U_\delta(p)$ – сигнал управления, $U_{в}(p)$ – напряжение возбуждения электромашиного возбудителя, $I_{в}(p)$ – ток возбуждения синхронного двигателя, $U(p)$ – напряжение узла нагрузки, $\cos\varphi(p)$ – коэффициент мощности, $I_{тв}(p)$ – ток узла нагрузки, $U_{ос}(p)$ – сигнал обратной связи.

К достоинствам систем, представленных на рис. 1.11 и 1.12 можно отнести значительно более низкие колебания напряжения сети и максимальную технически возможную отдаваемую в сеть реактивную мощность.

Кроме указанных систем управления для регулирования реактивной мощности синхронной машины могут быть использованы системы с обратной связью по активному или реактивному току статора, реактивной мощности и коэффициенту реактивной мощности синхронной машины.

Наиболее близкими к решаемым в диссертации задачам являются работы, рассмотренные ниже.

В работах [13, 32, 37, 38] получена функциональная схема управления параметрами синхронного двигателя и системы электроснабжения с обратными связями по углу нагрузки, реактивной мощности и коэффициенту реактивной мощности синхронного электропривода, а также по реактивной мощности и коэффициенту мощности узла нагрузки. К достоинствам данной схемы можно отнести ее гибкость. Недостатками являются сложность технической реализации, отсутствие сравнительного анализа используемых сигналов обратной связи и неопределенность способа формирования единого сигнала обратной связи.

Работы [76, 80, 84] предлагают использование структуры системы автоматического управления параметрами режима системы электроснабжения по таким переменным, как реактивная мощность и коэффициент реактивной мощности. Достоинствами данных работ является приведенный сравнительный анализ различных структур систем автоматического управления, рекомендации по принципу построения систем. Однако при построении системы управления реактивной мощностью электротехнического комплекса предприятия отсутствуют обратные связи по величинам коэффициента реактивной мощности или по величине реактивной мощности всего ЭТК, что ухудшает обработку возмущающих воздействий.

В работах [113, 125, 149, 152] показана система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности, ориентированная на стабилизацию напряжения узла нагрузки. Достоинством данной системы является учет процесса пуска мощного асинхронного двигателя. Недостатками данной системы являются отсутствие отрицательной обратной связи по величине коэффициента реактивной мощности или напряжению, что затрудняет выполнение системой ее функций, а также сложность используемой структуры.

Структура таких систем управления представлена на рис. 1.13.

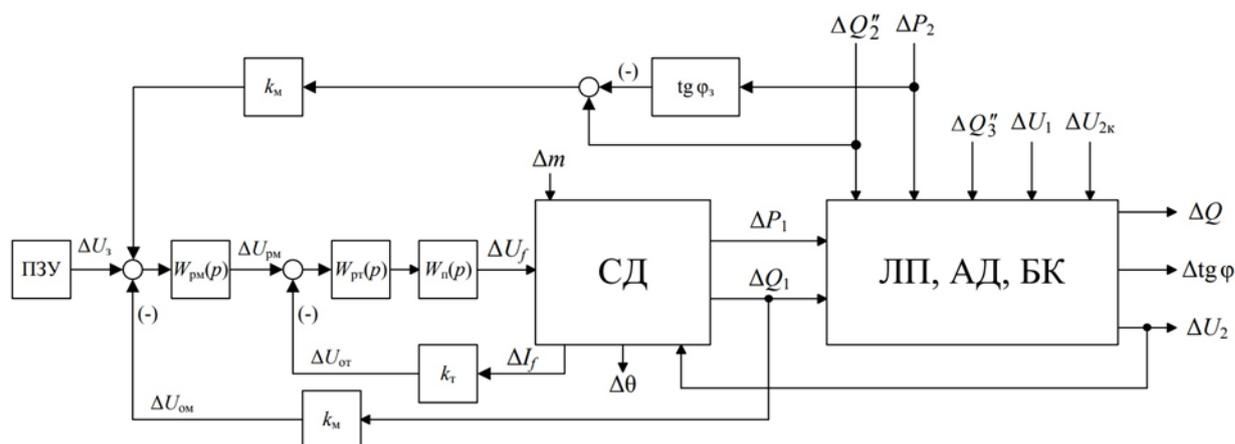


Рисунок 1.13 – Структурная схема синхронного электропривода с ООС по току возбуждения и реактивной мощности синхронного двигателя и компенсирующей связью по мощности нагрузки

На схеме: ПЗУ – программируемое задающее устройство, $W_{PM}(p)$ – передаточная функция регулятора мощности, $W_{PT}(p)$ – передаточная функция регулятора тока возбуждения, $W_{П}(p)$ – передаточная функция тиристорного возбудителя, СД – математическая модель синхронного двигателя, ЛП, АД, БК – математическая модель узла нагрузки, k_M – коэффициент передачи датчика мощности, k_T – коэффициент передачи датчика тока.

Достоинством такой системы управления величиной коэффициента реактивной мощности является то, что в модели объекта управления учтены колебания напряжения сети. Кроме того, двухконтурная структура со стабилизацией тока возбуждения в виде подчиненного контура регулирования позволяет сократить токовую перегрузку обмотки возбуждения синхронного двигателя, а наличие компенсирующей связи по возмущающему воздействию – точнее и с большим быстродействием регулировать коэффициент реактивной мощности.

Недостатком данной системы является отсутствие отрицательной обратной связи по величине коэффициента реактивной мощности, хотя система ориентирована на регулирование именно этого параметра. Таким образом, действие возмущений, влияющих на коэффициент реактивной мощности и не учтенных в математической модели, приведет к существенному ухудшению

точности регулирования величины коэффициента РМ. Такими возмущениями являются потери в трансформаторах подстанций.

В рассмотренных системах управления реактивной мощностью не учтены параметры конденсаторных установок, асинхронных двигателей и силовых трансформаторов, входящих в структуру узла нагрузки.

1.4. Выводы по первой главе

Проведенный обзор систем автоматического управления реактивной мощностью, где в качестве источников реактивной мощности используются управляемые конденсаторные установки и синхронные двигатели, позволяет сформулировать задачи исследования следующим образом:

1. Разработка математической модели ЭТК предприятия, включающего в себя систему электроснабжения, асинхронные и синхронные двигатели, конденсаторную установку, учитывающей потери активной и реактивной мощности в силовых трансформаторах и ориентированной на управление величиной коэффициента реактивной мощности.

2. Структурно-параметрический синтез САУ коэффициентом реактивной мощности ЭТК с синхронным электроприводом.

3. Моделирование и экспериментальное исследование САУ коэффициентом реактивной мощности ЭТК различной структуры

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

2.1 Функциональная схема электротехнического комплекса насосных станций и её составляющие

Один из вариантов схемы электроснабжения кустовых насосных станций нефтяных промыслов представлен на рис. 2.1 [90], а вариант схемы электроснабжения насосных станций мелиорации сельскохозяйственных культур показан на рис. 2.2 [99].

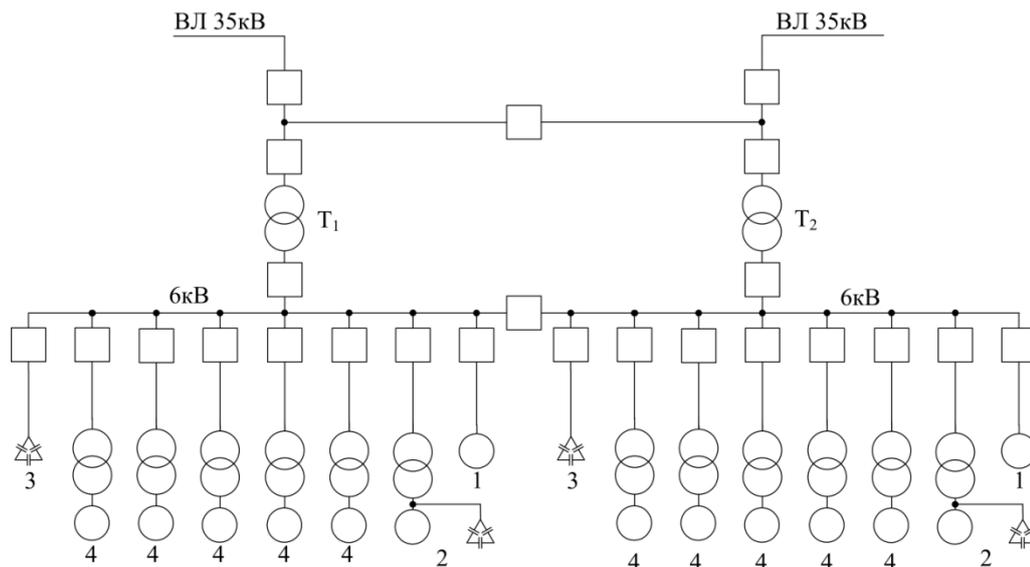


Рисунок 2.1 – Однолинейная схема системы электроснабжения нефтяных промыслов

На схеме (рис. 2.1) обозначено: T_1 и T_2 – силовые трансформаторы 35/6 кВ, 1 – электродвигатели насосов внешней перекачки нефти, 2 – кустовые трансформаторные подстанции с регулирующими конденсаторными установками, 3 – нерегулируемые конденсаторные установки, 4 – кустовые трансформаторные подстанции с различными насосными и технологическими агрегатами.

Используемый для примера электротехнический комплекс нефтяных промыслов (ЭТК НП) представляет собой схему электроснабжения с

двухтрансформаторной комплектной трансформаторной подстанцией (КТП), нагрузкой которой выступают асинхронные двигатели суммарной мощностью 9000 кВт, синхронные двигатели серии СТД суммарной мощностью 2500 кВт, конденсаторные батареи суммарной мощностью 1200 кВАр и силовые трансформаторы суммарной установленной мощностью 12МВА.

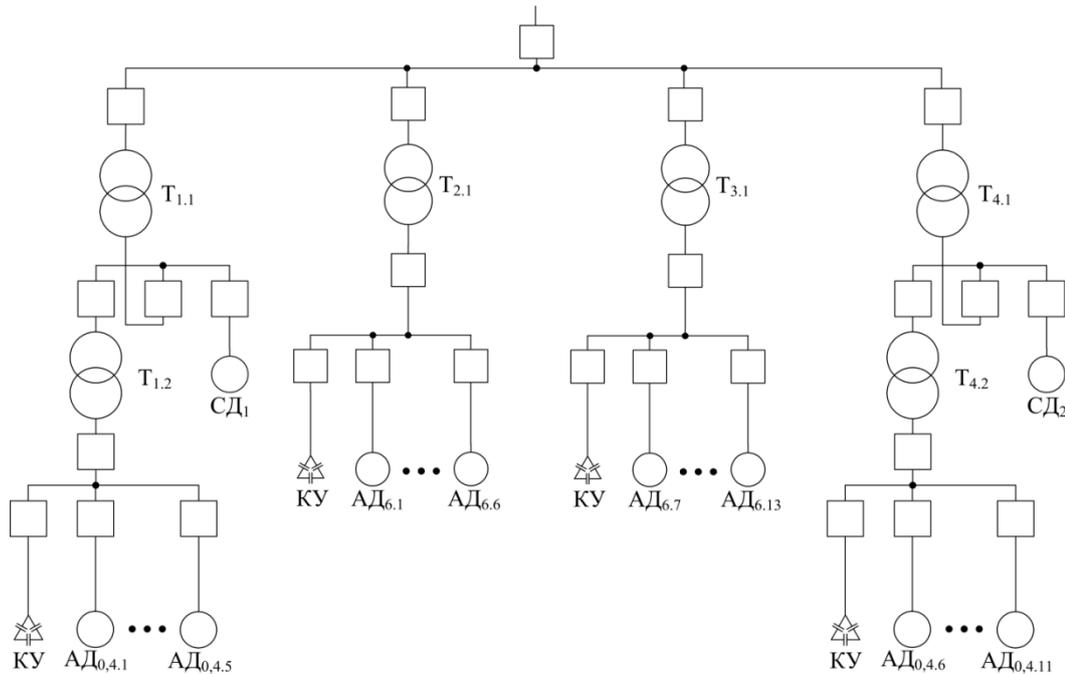


Рисунок 2.2 – Однолинейная схема электроснабжения насосных станций мелиорации

На схеме (рис. 2.2) использованы обозначения $T_{1.1}$, $T_{2.1}$, $T_{3.1}$, $T_{4.1}$ – силовые трансформаторы 35/6 кВ; $T_{1.2}$ и $T_{4.2}$ – силовые трансформаторы 6/0,4 кВ; КУ – регулируемые и нерегулируемые конденсаторные установки; $АД_{0.4.1} \div АД_{0.4.11}$ – асинхронные двигатели с номинальным напряжением 0,4 кВ; $АД_{6.1} \div АД_{6.13}$ – асинхронные двигатели с номинальным напряжением 6 кВ, $СД_1 \div СД_2$ – синхронные двигатели с номинальным напряжением 6 кВ.

В рассматриваемый в качестве примера ЭТК насосных станций мелиорации (ЭТК НСМ) состоящий из электротехнического комплекса предприятия, включающего силовые трансформаторы $T_{1.1}$ и $T_{4.1}$ типа ТМ-2500/35-У1, $T_{1.2}$ и $T_{4.2}$ типа ТМ 1600/6-У1, $T_{2.1}$ и $T_{3.1}$ типа ТМ-4000/35-У1 и потребителей в виде асинхронных двигателей А4-400У-4, АИР355М4 и др. суммарной мощностью 4600 кВт, синхронных двигателей СТД-630, конденсаторных установок УКРМ-

10,5-650 УЗ и УКРМ-0,4-105 УЗ суммарной мощностью 1510 кВАр.

В электротехнических комплексах предприятий с большим количеством асинхронных и синхронных двигателей, аналогичных рассмотренным выше, для упрощения анализа можно выделить общий элемент и назвать его обобщенной однолинейной функциональной схемой ЭТК, представленной на рис. 2.3.

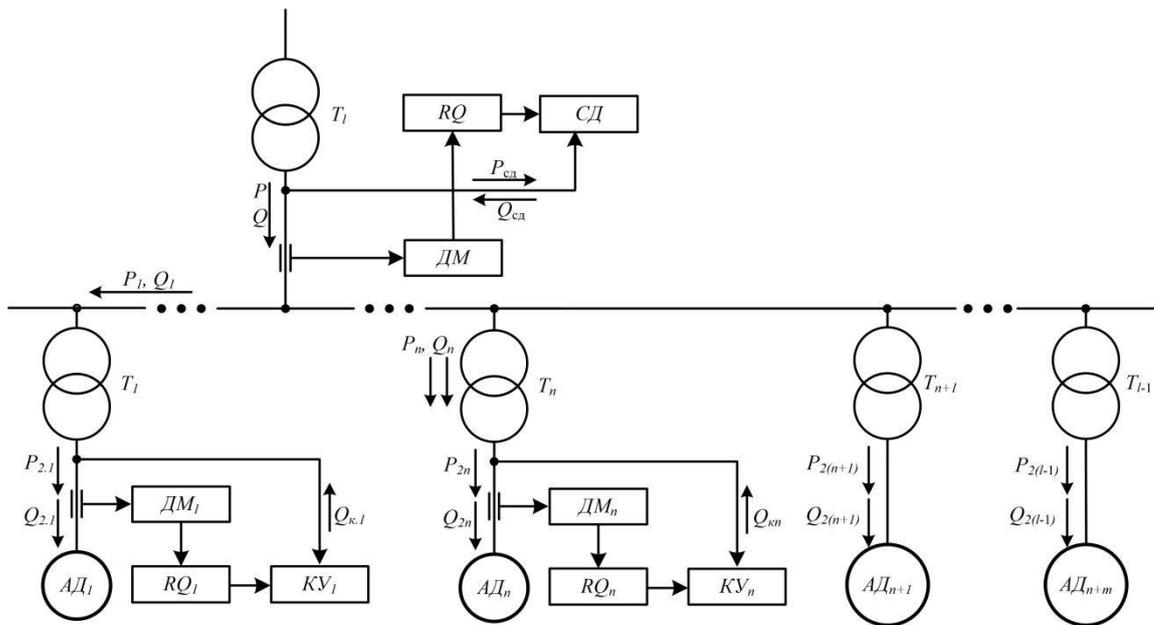


Рисунок 2.3 – Однолинейная обобщенная функциональная схема ЭТК

Обозначения на схеме: $T_1 \div T_{l-1}$ – трансформаторы цеховых подстанций, T_l – трансформатор главной понизительной подстанции; $ДМ_1 \div ДМ_n$ – датчики активной и реактивной мощности; $АД_1 \div АД_{n+m}$ – асинхронные двигатели; – регуляторы реактивной мощности; $КУ_1 \div КУ_n$ – конденсаторные установки; СД – синхронный двигатель.

Анализируя схему на рис. 2.3 можно выделить три типа подстанций используемых в ЭТК промышленного предприятия. Первый тип – подстанции с асинхронными двигателями без регулирования реактивной мощности (РМ), либо с установленными нерегулируемыми конденсаторными установками. Второй тип – подстанции с асинхронными двигателями и регулированием РМ с помощью конденсаторных установок с возможностью изменения их реактивной мощности. Третий тип – подстанции с асинхронными и синхронным двигателями, где в

качестве устройства регулирования реактивной мощности используется синхронный двигатель.

2.2. Управление коэффициентом реактивной мощности электротехнического комплекса предприятия

Нормативно-правовая база, используемая для оплаты за поставленную электроэнергию, формируется на основе постановления Правительства РФ от 27.12.2004 N 861 в редакции от 08.06.2023 [34], приказа от 31 августа 2010 г. N 219-э/6 Федеральной службы по тарифам [35], зарегистрированном в Министерстве Юстиции РФ 6 октября 2010 г., №18637 и приказа Министерства Энергетики РФ №380 от 23 июня 2015 г., зарегистрированного в Министерстве Юстиции РФ 22 июля 2015 г., N 38151 [39]. Исходя из анализа данных нормативно-правовых документов, в частности приложения приказа №380 [39] следует, что предельные значения потребляемой реактивной мощности определены исходя из коэффициента реактивной мощности. Предельные значения КРМ зависят от времени суток и номинального напряжения подстанции на границе балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности, которая определяется исходя из составленного акта между поставщиком и потребителем.

Предельные значения КРМ в часы больших суточных нагрузок (БСН) в зависимости от номинального напряжения сети $U_{СН}$, к которой подключен потребитель электроэнергии: $U_{СН} = 110$ кВ значение $tg\varphi_{П} = 0,5$; при $U_{СН} = 1 \div 35$ кВ - $tg\varphi_{П} = 0,4$; $U_{СН} < 1$ кВ - $tg\varphi_{П} = 0,35$. Значение коэффициента РМ в часы малых суточных нагрузок (МСН) устанавливается равным нулю для всех случаев. Часы БСН – с 7⁰⁰ до 23⁰⁰, а часы МСН – с 23⁰⁰ до 7⁰⁰.

Погрешность при управлении реактивной мощностью предприятия существенно зависит от того, на контроле какой величины КРМ или КМ построена САУ реактивной мощностью предприятия.

Сравнить погрешность в использовании величин $tg\varphi$ или $cos\varphi$ можно исходя из выражения [83]

$$\varepsilon = \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad (2.1)$$

где δ_1 и δ_2 – относительные величины погрешностей при управлении реактивной мощностью, которые определяются по выражениям

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{tg\varphi_2 - tg\varphi_1}{tg\varphi_1} 100\% \\ \delta_2 &= \frac{\cos arctg\varphi_2 - \cos arctg\varphi_1}{\cos arctg\varphi_1} 100\% \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $tg\varphi_1$ – значение коэффициента реактивной мощности до изменения нагрузки, $tg\varphi_2$ – значение коэффициента реактивной мощности после изменения нагрузки.

Рассмотрим в качестве примера значения коэффициента реактивной мощности $tg\varphi_1 = 0,5$ и $tg\varphi_2 = 0,54$. В этом случае значения величин δ_1 и δ_2 будут равны

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{0,54 - 0,5}{0,5} 100\% = 8\% \\ \delta_2 &= \frac{\cos 28,3 - \cos 26,6}{\cos 26,6} 100\% = \frac{0,88 - 0,89}{0,89} 100\% = 1,12\% \end{aligned}$$

Тогда величина погрешности, согласно (2.1), будет равна 7,14. Следовательно, при синтезе САУ реактивной мощностью, замкнутой по величине $tg\varphi$, чувствительность будет в 7 раз выше, чем при построении САУ, замкнутой по величине $cos\varphi$.

Данный вывод подтверждается путем проведения двух вычислительных экспериментов. Оба эксперимента основаны на известных выражениях

$$\begin{aligned} tg\varphi &= \frac{Q}{P}, \\ \cos\varphi &= \frac{P}{S}. \end{aligned}$$

где Q – реактивная мощность, P – активная мощность, S – полная мощность.

Первый эксперимент основан на требованиях к регулированию реактивной мощности [39], исходя из которых в часы МСН величина $tg\varphi = 0$, величина $cos\varphi = 1$, а в часы БСН $tg\varphi = 0,4$, $cos\varphi = 0,93$. Предположим, что активная мощность равна активной мощности асинхронных двигателей ЭТК НП $P_{АД} = 9000$ кВт, тогда с учетом $tg\varphi = 0,4$ получим, что $Q_{АД} = 3600$ кВАр, $S_{АД} = 9693$ кВА, а величина $cos\varphi = 0,93$. Графики изменения величин $tg\varphi$ и $cos\varphi$ в суточном диапазоне представлены на рис. 2.4.

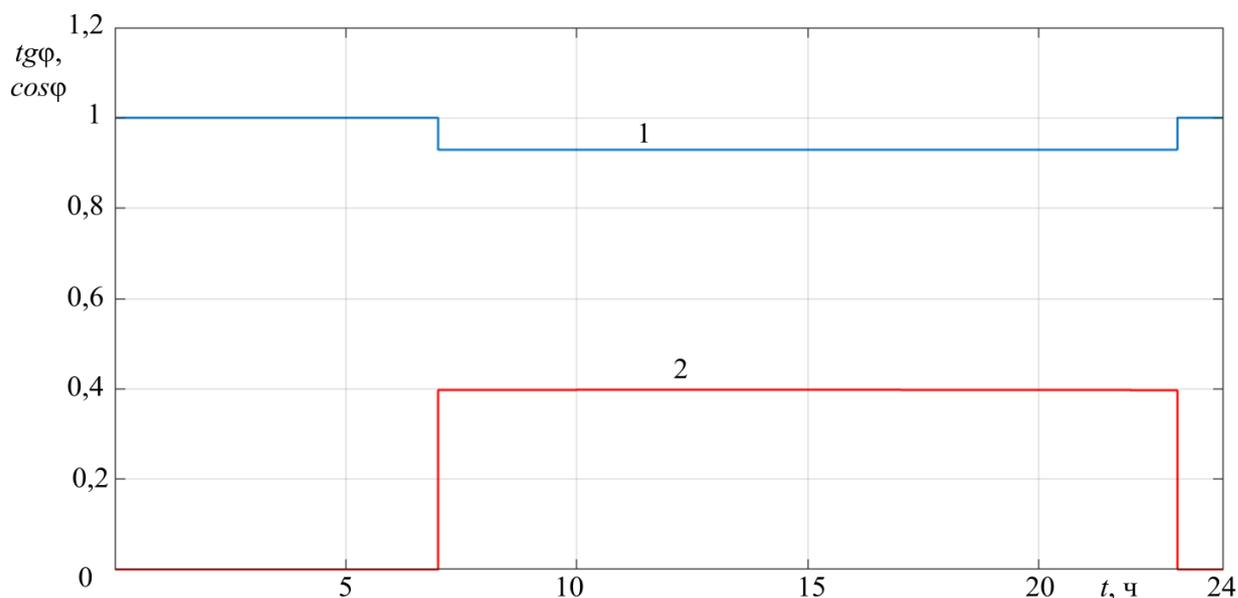


Рисунок 2.4 – Графики суточных величин $tg\varphi$ и $cos\varphi$: 1 – $cos\varphi$, 2 – $tg\varphi$

Из анализа графика изменения КРМ и коэффициента мощности (КМ) в суточном диапазоне (рис. 2.4) следует, что изменение величин КРМ и КМ при одинаковых ступенчатых изменениях нагрузки имеет существенную разницу в относительных величинах. Так изменение величины коэффициента мощности $\delta_{cos\varphi} = 7\%$, а изменение величины коэффициента реактивной мощности $\delta_{tg\varphi} = 40\%$. Разница в изменении этих величин при одинаковых изменениях нагрузки составляет 5,7 раза. Следовательно, при построении системы автоматического управления реактивной мощностью предприятия при одинаковом воздействии на систему сигнал обратной связи будет изменяться в 5,7 раза больше при использовании величины КРМ, нежели при использовании величины КМ, что позволяет повысить точность САУ.

Для второго вычислительного эксперимента используем те же данные, что и для первого с тем отличием, что реактивная мощность плавно изменяется от 0 до 600 кВАр. В этом случае получим зависимости $tg\varphi(Q)$ и $cos\varphi(Q)$, показанные на рис. 2.5.

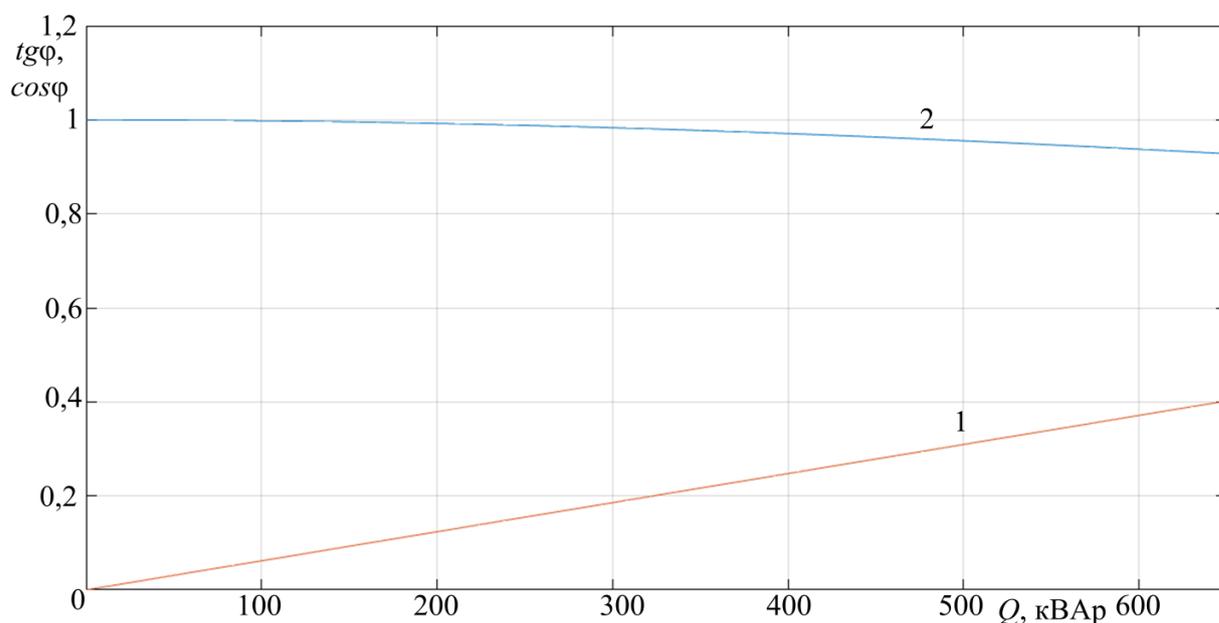


Рисунок 2.5 – Графики изменения величин $tg\varphi(Q)$ и $cos\varphi(Q)$ при плавном изменении реактивной мощности: 1 - $tg\varphi(Q)$, 2 - $cos\varphi(Q)$

Анализ формы графиков коэффициента мощности и коэффициента реактивной мощности при плавном изменении реактивной мощности (рис. 2.5) показывает, что величина КРМ при изменении реактивной мощности является плавно нарастающей, а величина КМ при изменении реактивной мощности имеет слабопадающую зависимость. Это значительно усложняет синтез САУ РМ предприятия за счет повышенных требований к точности измерения величины КМ. Следовательно, для построения системы управления реактивной мощностью предприятия предпочтительно в качестве координаты обратной связи использовать величину КРМ, так как это позволяет снизить требования к погрешности датчиков обратной связи и упростить синтез САУ.

2.3. Математическая модель трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности

2.3.1. Уравнения потерь активной и реактивной мощности в трансформаторе

При математическом моделировании трансформаторной подстанции принимается ряд допущений:

- напряжение питания на шинах трансформаторной подстанции не изменяется;
- потери «в стали» трансформатора постоянны;
- ток холостого хода и напряжение короткого замыкания соответствуют паспортным данным на трансформатор.

Важной и недостаточно исследованной проблемой при регулировании реактивной мощности является отсутствие учета внутренних потерь обусловленных нагревом обмоток, потерями в стали и наличием полей рассеяния в трансформаторах подстанций. Наличие постоянных и переменных потерь мощности существенно влияет на коэффициент реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции.

Потери активной мощности в трансформаторах принято разделять [73, 97, 119] на постоянные потери в стали магнитопровода или потери холостого хода P_C и переменные потери P_V в его обмотках.

Постоянные потери активной мощности (потери холостого хода) определяются по паспортным данным. Переменные потери определяются по выражению

$$P_V = a_1 \left((P_2 + P_\alpha)^2 + (Q_2 - Q_\alpha)^2 \right) \quad (2.3)$$

где P_2 – активная мощность потребителей электроэнергии, P_α – активная мощность, потребляемая компенсирующими устройствами, Q_2 – реактивная мощность потребителей, Q_α – реактивная мощность компенсирующих устройств.

Коэффициент a_1

$$a_1 = \frac{P_K}{S_{TH}^2},$$

где P_K – потери мощности при коротком замыкании трансформатора; S_{TH} – полная номинальная мощность трансформатора.

Потери реактивной мощности в трансформаторе разделяются на постоянные потери в магнитопроводе, зависящие от его намагничивания

$$Q_\mu = \frac{I_x \% S_{TH}}{100}, \quad (2.4)$$

и реактивной мощности полей рассеивания

$$Q_v = a_2 \left((P_2 + P_\alpha)^2 + (Q_2 - Q_\alpha)^2 \right), \quad (2.5)$$

$$a_2 = \frac{U_K \%}{100 S_{TH}},$$

где U_K – напряжение короткого замыкания, $I_{xx} \%$ – ток холостого хода трансформатора.

Тогда коэффициент реактивной мощности на стороне низшего напряжения (НН) трансформатора

$$\operatorname{tg} \varphi_d = \frac{(Q_2 - Q_\alpha)}{(P_2 + P_\alpha)} \quad (2.6)$$

На стороне высшего напряжения (ВН) трансформатора коэффициент реактивной мощности определяется исходя из суммы мощностей подключенных потребителей, а также постоянных и переменных потерь мощности

$$\operatorname{tg} \varphi_v = \frac{Q_r}{P_r}, \quad (2.7)$$

где Q_r – суммарная реактивная мощность на стороне ВН трансформаторной подстанции, P_r – суммарная активная мощность на стороне ВН трансформаторной подстанции.

$$Q_r = Q_2 - Q_\alpha + Q_\mu + Q_v,$$

$$P_r = P_2 + P_\alpha + P_C + P_V.$$

В уравнениях (2.3) - (2.7) при отсутствии статических конденсаторных батарей, являющихся источниками РМ, параметры $P_\alpha = Q_\alpha = 0$.

Математическую модель трансформаторной подстанции в статическом режиме работы можно представить в виде системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} P_V &= a_1 \left((P_2 + P_\alpha)^2 + (Q_2 - Q_\alpha)^2 \right) \\ Q_V &= a_2 \left((P_2 + P_\alpha)^2 + (Q_2 - Q_\alpha)^2 \right) \\ Q_\mu &= \frac{I_x \% S_{THi}}{100} \\ a_1 &= \frac{P_K}{S_{TH}^2} \\ a_2 &= \frac{U_K \%}{100 S_{TH}} \\ \operatorname{tg} \varphi_V &= \frac{Q_2 - Q_\alpha + Q_\mu + Q_V}{P_2 + P_\alpha + P_C + P_V} \\ \operatorname{tg} \varphi_d &= \frac{Q_2 - Q_\alpha}{P_2 - P_\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Структурная схема подстанции как объекта управления величиной КРМ на стороне ВН и на стороне НН, соответствующая уравнениям (2.8), приведена на рис. 2.6.

Таким образом, получена математическая модель силового трансформатора, учитывающая влияние постоянных и переменных потерь в трансформаторе на КРМ. Входными координатами в этой модели являются потребляемые активная и реактивная мощности. Выходными координатами – активная и реактивная мощности на стороне высшего напряжения трансформатора, а также коэффициент реактивной мощности.

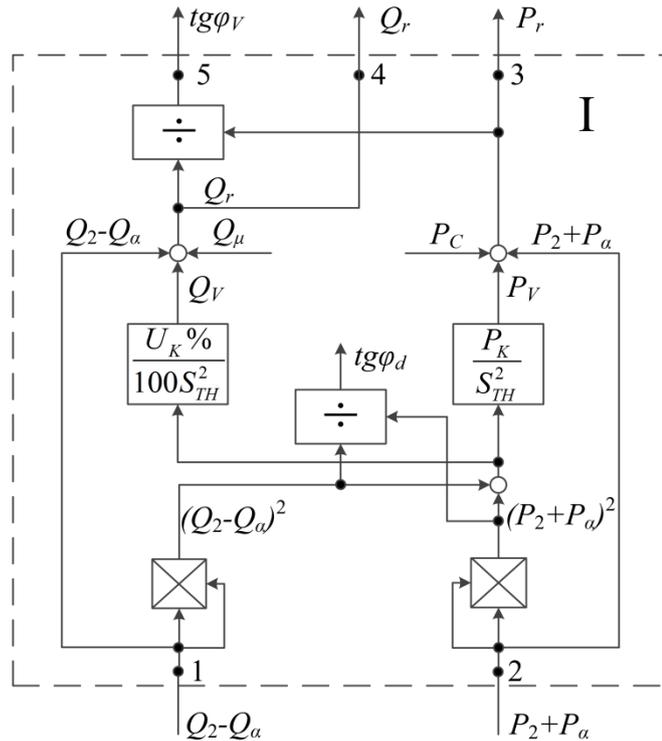


Рисунок 2.6 - Структурная схема подстанции без источников РМ

2.3.2. Определение параметров трансформаторов

Использованная в качестве примера ЭТК НСМ, включает в себя силовые трансформаторы ТМ-4000/35-У1, ТМ-2500/35-У1 и ТМ 1600/6-У1, определение расчетных параметров которых необходимо для дальнейших расчетов.

Силовой масляный трансформатор марки ТМ-2500/35-У1: $S_{TH} = 2500$ кВА, напряжение на стороне ВН 35 кВ, напряжение на стороне НН 6,3 кВ, потери холостого хода $P_C = 3,9$ кВт, потери короткого замыкания $P_K = 23,5$ кВт, ток холостого хода $I_{xx}\% = 1\%$, напряжение короткого замыкания $U_K = 6,5\%$ [78].

Силовой масляный трансформатор марки ТМ 1600/6-У1: $S_{TH} = 1600$ кВА, напряжение на стороне ВН 6 кВ, напряжение на стороне НН 0,4 кВ, потери холостого хода $P_C = 2,3$ кВт, потери короткого замыкания $P_K = 16,5$ кВт, ток холостого хода $I_{xx}\% = 0,8\%$, напряжение короткого замыкания $U_K = 6\%$ [78].

Силовой масляный трансформатор марки ТМ-4000/35-У1: $S_{TH} = 4000$ кВА, напряжение на стороне ВН 35 кВ, напряжение на стороне НН 6,3 кВ, потери

холостого хода $P_C = 5,6$ кВт, потери короткого замыкания $P_K = 33,5$ кВт, ток холостого хода $I_{xx}\% = 0,9\%$, напряжение короткого замыкания $U_K = 7,5\%$ [78].

Величина активных потерь в стали P_C является паспортной и не требует вычисления. Потери реактивной мощности, рассчитанные для ТМ-2500/35-У1

$$Q_\mu = \frac{I_x \% S_{TH}}{100} = \frac{1 \cdot 2500}{100} = 25 \text{ кВАр.}$$

Коэффициенты a_1 и a_2

$$a_1 = \frac{P_K}{S_{TH}^2} = \frac{23,5}{2500^2} = 3,76 \cdot 10^{-6}$$

$$a_2 = \frac{U_K \%}{100 S_{TH}} = 0,026 \cdot 10^{-3}$$

Значения потерь и коэффициентов для трансформаторов ТМ 1600/6-У1, ТМ-4000/35-У1, ТМ-2500/35-У1 приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Потери холостого хода и коэффициенты трансформаторов ТМ-4000/35-У1, ТМ-2500/35-У1 и ТМ 1600/6-У1

	ТМ-1600/6-У1	ТМ-2500/35-У1	ТМ-4000/35-У1
P_C , кВт	2,3	3,9	5,6
Q_μ , кВАр	12,8	25	36
a_1	$6,45 \cdot 10^{-6}$	$3,76 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$
a_2	$0,038 \cdot 10^{-3}$	$0,026 \cdot 10^{-3}$	$0,019 \cdot 10^{-3}$

В данном параграфе найдены параметры силовых трансформаторов, для последующего компьютерного моделирования стационарного режима ЭТК НСМ.

2.3.3. Суточные графики коэффициента реактивной мощности без регулирования

Модель объекта, где входными переменными являются активная и реактивная мощности потребителей, выходными – суммарные активная и реактивная мощности и коэффициент реактивной мощности (рис. 2.6), реализованная в графической среде моделирования MATLAB Simulink,

представлена на рис. 2.7. Она включает в себя источники ступенчатых сигналов step, блоки умножения сигналов product, усилители gain, сумматоры sum и осциллографы scope. Поскольку моделируется статический режим работы трансформаторной подстанции, то блоки, описывающие динамику систем, не используются.

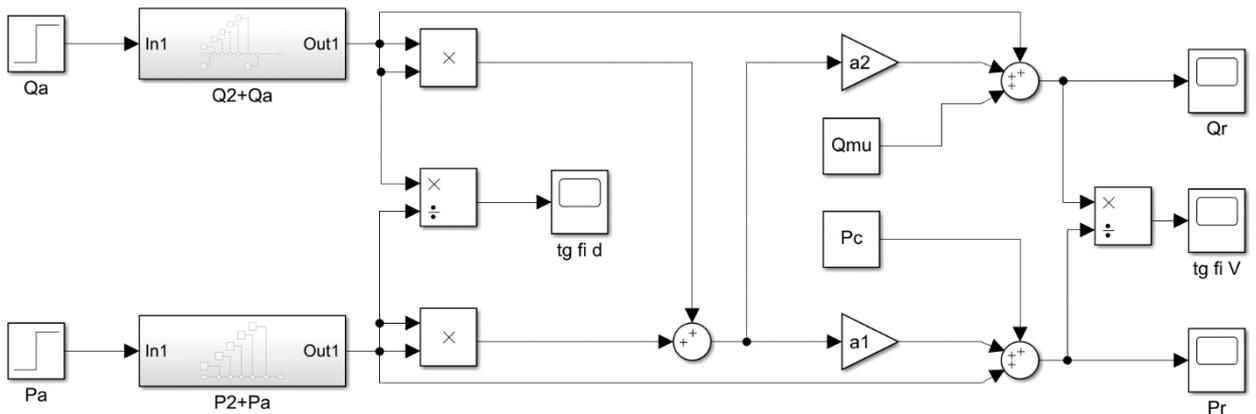


Рисунок 2.7 – Имитационная модель трансформаторной подстанции без источников РМ в графической среде моделирования MATLAB Simulink

Активная P_a и реактивная Q_a мощности заданы в виде графиков суточной нагрузки трансформаторных подстанций Т1.2 и Т4.2 ЭТК НСМ (рис. 2.2) и представлены на рис. 2.8.

Суточные графики коэффициента реактивной мощности на стороне НН показаны на рис. 2.9, суточные графики коэффициента реактивной мощности на стороне ВН – на рис. 2.10.

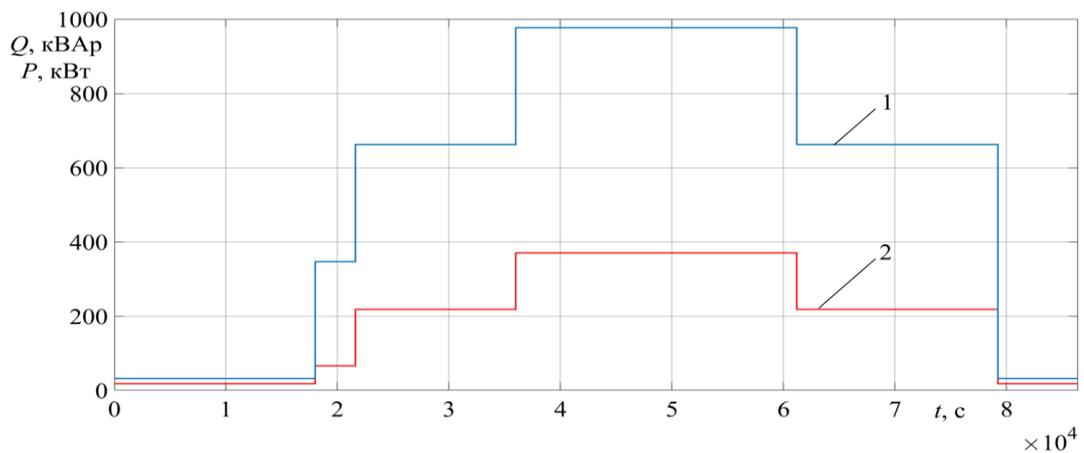


Рисунок 2.8 – Графики суточной нагрузки: 1- график активной суточной нагрузки $P_2(p)$, 2 – график реактивной суточной нагрузки $Q_2(p)$

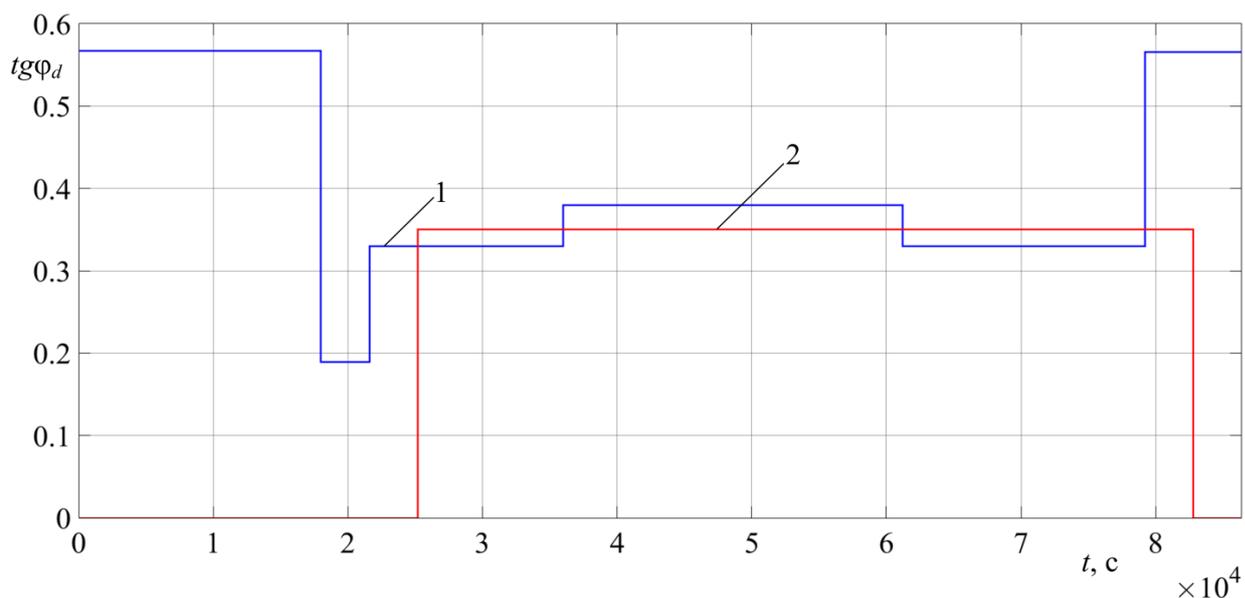


Рисунок 2.9 – Суточный график КРМ на стороне НН: 1 – график изменения величины КРМ на стороне НН трансформатора, 2 – график предельного значения коэффициента реактивной мощности

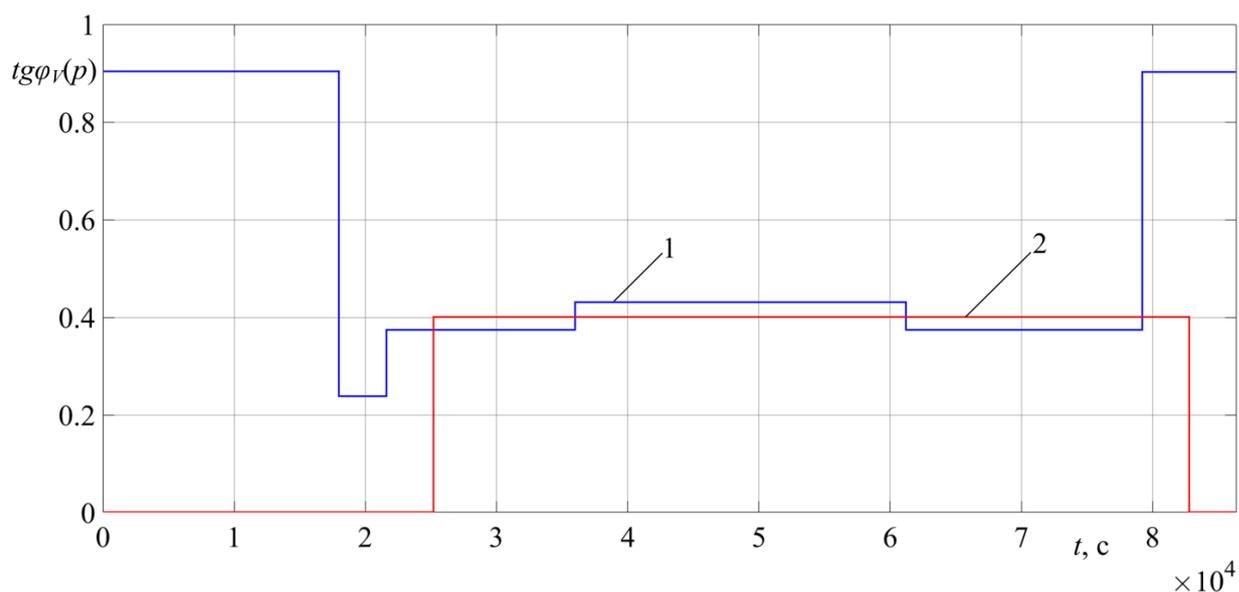


Рисунок 2.10 – Суточный график КРМ на стороне ВН: 1 – график изменения величины КРМ на стороне ВН трансформатора, 2 – график предельного значения коэффициента реактивной мощности КРМ

В часы МСН предельным значением КРМ для всех классов напряжений является 0, а в часы БСН на стороне НН 0,35, на стороне ВН 0,4, что показано на графиках.

Анализ суточных графиков коэффициента реактивной мощности на сторонах НН и ВН (рис. 2.9 и 2.10) показывает, что в часы работы трансформаторов с малой нагрузкой (совпадают с часами МСН) коэффициент реактивной мощности имеет большую величину и существенно превышает установленные нормы [39]. Таким образом, на стороне ВН трансформатора за счет наличия постоянных и переменных потерь реактивной мощности величина коэффициента реактивной мощности выше, чем на стороне НН на 55% в часы МСН и на 10% в часы БСН.

2.4. Управление коэффициентом реактивной мощности на стороне низшего напряжения трансформаторной подстанции

2.4.1. Математическая модель САУ КРМ на стороне НН

Управление коэффициентом реактивной мощности на стороне низшего напряжения трансформаторной подстанции [73, 83, 119] удобнее всего реализовать в функции активной и реактивной мощностей потребителей (2.9), так как данный способ отличается простотой технической реализации и высоким быстродействием. В качестве источников РМ в данном случае обычно выступают регулируемые конденсаторные установки (рис. 2.1 и 2.2). Закон управления, сформированный в функции активной и реактивной мощностей потребителей, имеет вид

$$U_{\delta} = k_M Q_2 - k_M (P_2 + P_{\alpha}) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}, \quad (2.9)$$

где U_{δ} – сигнал управления, k_M – коэффициент передачи датчиков мощности; $\operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}$ – заданное значение коэффициента реактивной мощности на стороне НН трансформаторов.

Тогда реактивная мощность источника РМ

$$Q_K = k_C U_{\delta}, \quad (2.10)$$

где, k_C – коэффициент передачи САУ $\operatorname{tg} \varphi_d$, Q_K – реактивная мощность, вырабатываемая конденсаторной установкой.

Реактивная мощность конденсаторной установки при коэффициенте передачи САУ $k_C = k_M^{-1}$ в статическом режиме составит

$$Q_K = Q_2 - (P_2 + P_\alpha) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}, \quad (2.11)$$

В этом случае выражения переменных потерь мощности в трансформаторе (2.3), (2.5) после подстановки в них (2.11), можно упростить

$$P_V = a_1 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) (P_2 + P_\alpha)^2, \quad (2.12)$$

$$Q_V = a_2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) (P_2 + P_\alpha), \quad (2.13)$$

Коэффициент реактивной мощности на стороне НН трансформатора при использовании САУ $\operatorname{tg} \varphi_d$ согласно (2.11) равен заданному при любых возмущающих воздействиях $P_2 + P_\alpha$ и Q_2 ,

$$\operatorname{tg} \varphi_d = \frac{Q_2 - Q_K}{P_2 + P_\alpha} = \frac{(P_2 + P_\alpha) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}}{P_2 + P_\alpha} = \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}. \quad (2.14)$$

Тогда коэффициент реактивной мощности на стороне ВН трансформатора

$$\operatorname{tg} \varphi_V = \frac{Q_2 - Q_K + Q_\mu + Q_V}{P_2 + P_\alpha + P_C + P_V}. \quad (2.15)$$

Подставив выражение (2.11) в (2.15) получим

$$\operatorname{tg} \varphi_V = \frac{(P_2 + P_\alpha) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon} + Q_\mu + Q_V}{P_2 + P_\alpha + P_C + P_V} \quad (2.16)$$

Отсюда следует, что на величину КРМ на стороне ВН трансформатора не влияют реактивные мощности нагрузки и источника РМ.

Математическая модель, описывающая статический режим работы САУ $\operatorname{tg} \varphi_d$ согласно выражениям (2.9-2.13), (2.14) и (2.16) может быть записана в виде системы уравнений (2.17).

Структурная схема трансформаторной подстанции с САУ $\operatorname{tg} \varphi_d$, соответствующая (2.17), изображена на рис. 2.13.

$$\left. \begin{aligned}
 U_{\delta i} &= K_m Q_{2i} - K_m (P_{1i} + P_{2i}) \operatorname{tg} \varphi_{3i}, \\
 Q_K &= K_C U_{\delta} \\
 Q_K &= Q_2 - (P_2 + P_{\alpha}) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon} \\
 P_V &= a_1 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) (P_2 + P_{\alpha})^2 \\
 Q_V &= a_2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) (P_2 + P_{\alpha})^2 \\
 \operatorname{tg} \varphi_d &= \frac{Q_2 - Q_K}{P_2 + P_{\alpha}} = \frac{(P_2 + P_{\alpha}) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}}{P_2 + P_{\alpha}} = \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon} \\
 \operatorname{tg} \varphi_V &= \frac{(P_2 + P_{\alpha}) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon} + Q_{\mu} + Q_V}{P_2 + P_{\alpha} + P_C + P_V}
 \end{aligned} \right\} (2.17)$$

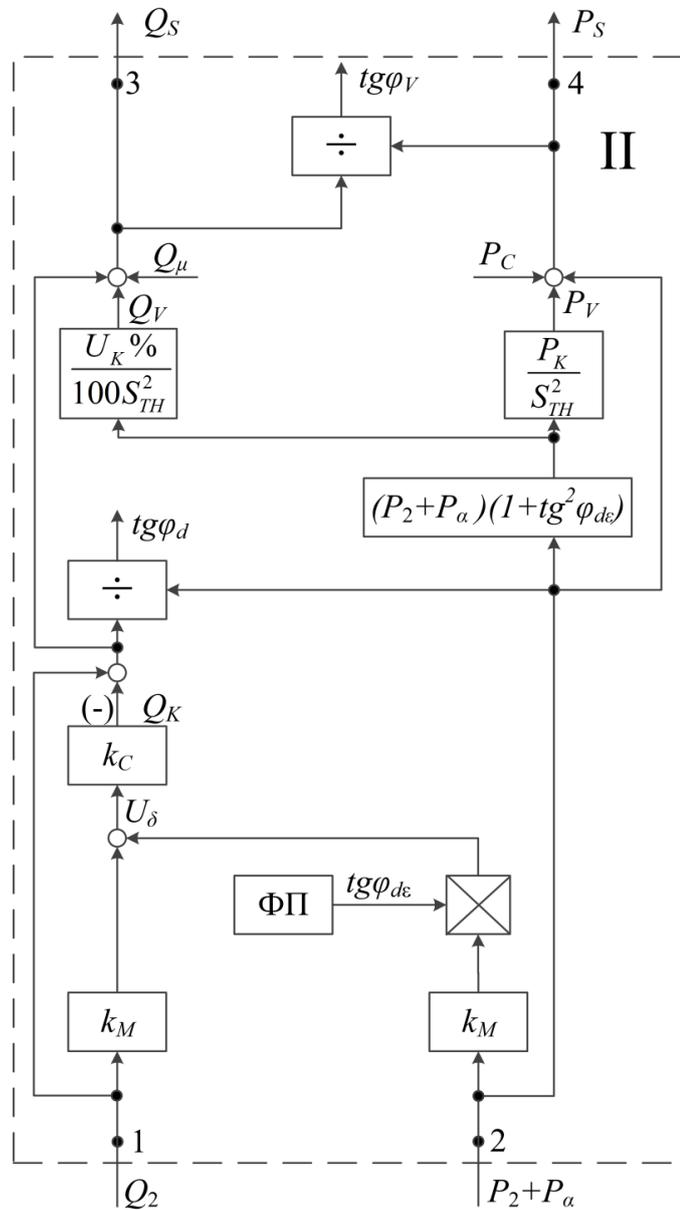


Рисунок 2.11 – Структурная схема подстанции с САУ КРМ на стороне НН

Таким образом, получена математическая модель трансформаторной подстанции с конденсаторной установкой и САУ использующей алгоритм управления в функции активной и реактивной мощностей потребителей. Входными координатами в этой модели являются потребляемые активная и реактивная мощности. Выходными координатами – активная и реактивная мощности на стороне высшего напряжения трансформатора, а также коэффициент реактивной мощности.

2.4.2. Суточные графики коэффициента реактивной мощности с регулированием на стороне низшего напряжения трансформатора

В САУ $tg\varphi_d$ (рис. 2.11) управляющим воздействием является величина заданного коэффициента реактивной мощности, а возмущающим воздействием согласно (2.16) – активная мощность нагрузки. Однако величина РМ нагрузки при изменении активной мощности, связанной с пуском асинхронных двигателей, также будет изменяться и являться возмущающим воздействием. Возмущающие воздействия представляют собой графики суточных нагрузок трансформаторных подстанций Т2.1 и Т3.1 ЭТК НСМ (рис. 2.2) и приведены на рис. 2.12.

Суточные графики коэффициентов реактивной мощности на сторонах ВН и НН показаны на рис. 2.13.

Из анализа суточных графиков коэффициента реактивной мощности (рис. 2.13) следует, что величина КРМ на стороне НН полностью повторяет заданную кривую коэффициента реактивной мощности (рис. 2.10 кривая 2), что подтверждает инвариантность данной системы к возмущающему воздействию со стороны потребителей активной и реактивной мощности. Суточный график коэффициента реактивной мощности на стороне ВН трансформатора показывает, что при использовании САУ $tg\varphi_d$ в часы МСН отклонение от предельного значения составляет менее 5% от требуемого значения, а в часы БСН – менее 1%.

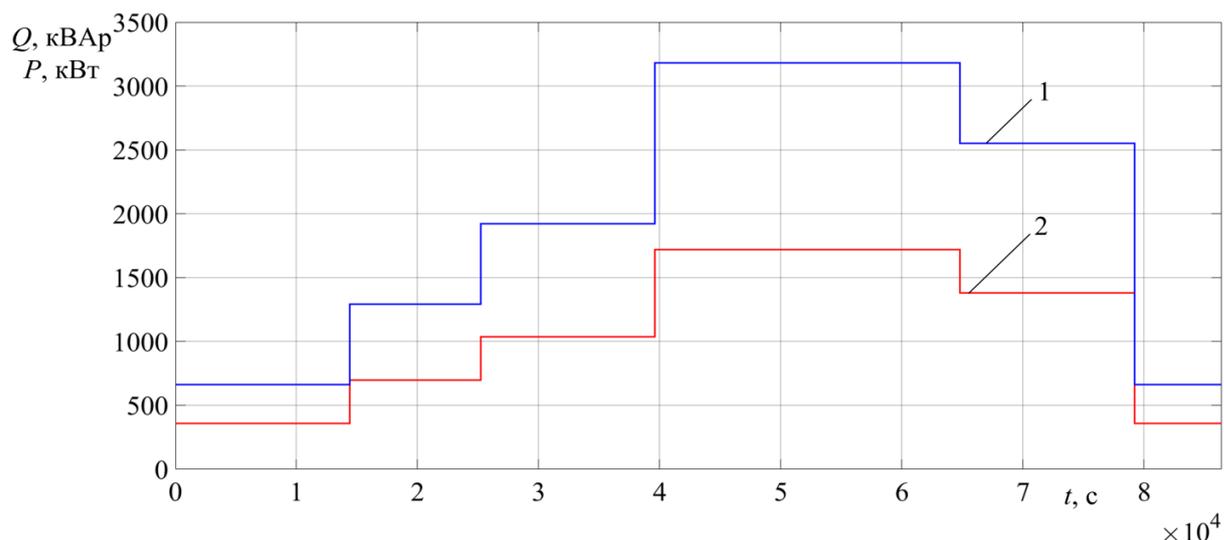


Рисунок 2.12 – Графики суточной нагрузки: 1- график активной мощности, 2 – график реактивной мощности

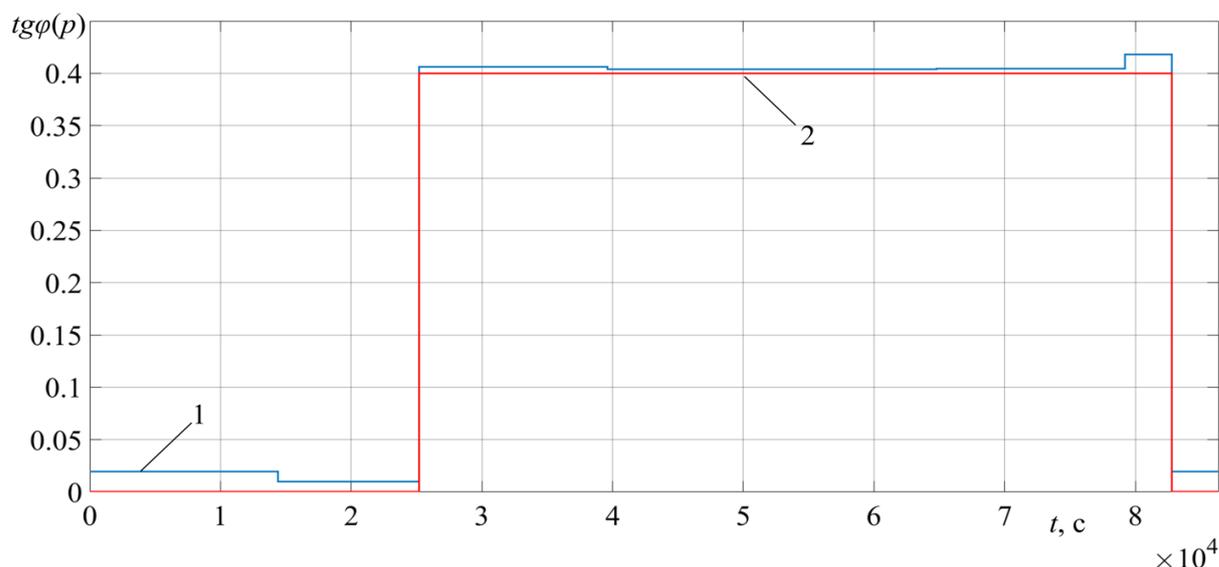


Рисунок 2.13 – Суточные графики КРМ на стороне ВН и НН: 1 – график изменения величины КРМ на стороне ВН трансформатора, 2 – график изменения величины КРМ на стороне НН трансформатора

Приведенный анализ не дает полного представления о характере суточного изменения коэффициента реактивной мощности, так как в проведенных вычислительных экспериментах классы напряжений на стороне высшего и низшего напряжения трансформатора являются одинаковыми (класс СН) и ступени конденсаторов подобраны таким образом, чтобы реактивная мощность ступени была близка к реактивной мощности включаемого асинхронного двигателя. Такой выбор реактивной мощности ступени необходим для

уменьшения ошибки возникающей при регулировании КРМ. В случае неверного выбора ступеней и различного класса напряжений разница между заданным и полученным значением КРМ на стороне ВН будет существенно больше и может достигать 25% [83].

Суточные графики коэффициентов реактивной мощности на стороне ВН и коэффициента реактивной мощности на стороне НН показаны на рис. 2.14.

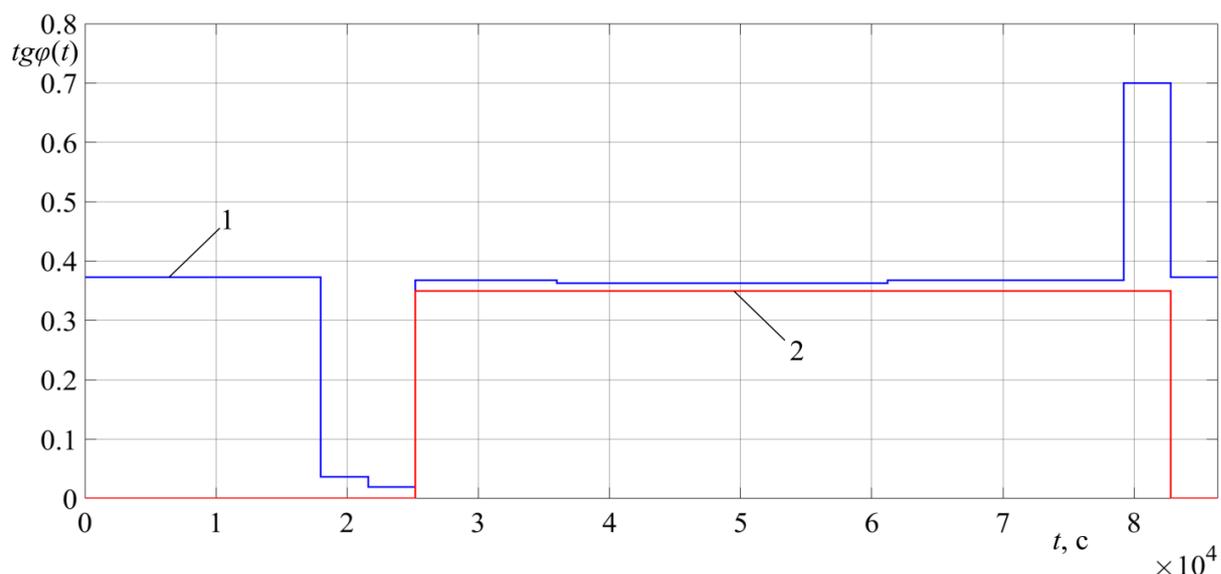


Рисунок 2.14 – Суточные графики КРМ на стороне ВН и НН: 1 – график изменения КРМ на стороне ВН трансформатора, 2 – график изменения КРМ на стороне НН трансформатора

Анализ переходных характеристик КРМ на сторонах ВН и НН (рис. 2.14) показывает, что величина КРМ на стороне НН равна заданной величине КРМ, что подтверждает инвариантность системы к возмущающему воздействию. График суточного изменения величины КРМ на стороне ВН показывает, что в часы БСН за счет разницы в предельных значениях КРМ, связанных с различными классами напряжений, предельные значения КРМ не превышены, кроме момента скачкообразного уменьшения нагрузки. В часы МСН значения КРМ значительно превышают предельные значения.

Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод, что использование конденсаторных установок с алгоритмом управления в функции активной и реактивной мощности потребителей для управления коэффициентом реактивной

мощности дает неудовлетворительные результаты по величине максимальных значений КРМ в часы БСН и МСН.

2.5. Управление коэффициентом реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции

2.5.1. Математическая модель САУ КРМ на стороне ВН

Управление коэффициентом реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции должно быть реализовано не только в функции активной и реактивной мощности потребителей, но и с учетом потерь мощности в трансформаторе [83, 86, 119]. Таким образом, закон управления формируется в функции мощности потребителя и потерь мощности в питающих трансформаторах, так как в предыдущих параграфах показано, что потери активной и реактивной мощности в трансформаторе существенно влияют на величину КРМ. В качестве источника реактивной мощности удобнее всего использовать синхронный двигатель.

Структурная схема подстанции с регулируемым источником РМ в виде синхронного двигателя отличается от схемы на рис. 2.11 наличием в ней вычислительного устройства, реализующего закон управления.

Закон управления $F(x)$, формирующий сигнал задания U_δ системы управления РМ синхронного двигателя [83], можно найти из (2.15).

$$\operatorname{tg} \varphi_V = \frac{Q_{I1} + Q_V - Q_{CD}}{P_{I1} + P_V}, \quad (2.18)$$

где

$$P_{I1} = P_I + P_{CD} + P_C,$$

$$Q_{I1} = Q_I + Q_\mu.$$

Тогда переменные потери в трансформаторе

$$Q_{V(n+1)} = a_{2l} \left(P_{l1}^2 + (Q_{l1} - Q_{CD})^2 \right), \quad (2.19)$$

$$P_{V(n+1)} = \frac{a_{1l} Q_{V(n+1)}}{a_{2l}}.$$

Как следует из (2.19) потери зависят от реактивной мощности синхронного двигателя Q_{CD} , которая является неизвестной величиной.

В виду небольшой величины мощности $P_{V(n+1)}$ для упрощения определения $F(x)$, представим ее приближенным соотношением

$$P_{V(n+1)} = a_{1l} \left(1 + tg^2 \varphi_{d\varepsilon} \right) P_{l1}^2. \quad (2.20)$$

Тогда из (2.18) приравняв КРМ на стороне ВН к заданному значению, а также по аналогии с выражением (2.10) $Q_{CD} = k_M^{-1} U_\delta$, величина заданного значения КРМ определится по выражению

$$tg \varphi_{V\varepsilon} = \frac{Q_{l1} + a_{2l} \left(\left(P_{l1} + P_{V(n+1)} \right)^2 + \left(Q_{l1} - k_M^{-1} U_\delta \right)^2 \right) - k_M^{-1} U_\delta}{P_{l1} + P_{V(n+1)}}.$$

Представим выражение величины заданного значения КРМ в виде квадратного уравнения

$$U_\delta^2 - a_3 U_\delta + a_4 = 0, \quad (2.21)$$

где

$$a_3 = 2Q_{l1} + \frac{100S_{THI}}{U_K \%},$$

$$a_4 = Q_{l1}^2 + P_{l1}^2 + \frac{100 \left(Q_{l1} - \left(P_{l1} + P_{V(n+1)} \right) tg \varphi_{V\varepsilon} \right) S_{THI}}{U_K \%}.$$

Из решения уравнения (2.21) получим

$$U_\delta = F(x) = k_M \left(\frac{a_3}{2} - \sqrt{\frac{a_3^2}{4} - a_4} \right), \quad (2.22)$$

где

$$x = (a_{1l}, a_{2l}, P_{l1}, Q_{l1}, tg \varphi_{V\varepsilon}).$$

Математическая модель, описывающая статический режим работы САУ $tg\varphi_V$ согласно выражениям (2.18-2.22) может быть записана в виде системы уравнений (2.23).

Структурная схема трансформаторной подстанции с синхронным двигателем, оборудованной САУ $tg\varphi_V$ (рис. 2.15), построена согласно математической модели (2.23). На этой схеме ЭД – элемент деления, ФП – формирователь программы.

Таким образом, получена модель трансформаторной подстанции с САУ КРМ на стороне ВН и закон управления КРМ учитывающий потери активной и реактивной мощностей в силовом трансформаторе.

$$\left. \begin{aligned}
 tg\varphi_\varepsilon &= \frac{k_M(Q_{2l} + Q_{\mu l} + Q_{vl}) - U_\delta}{k_M(P_l + P_{Cl} + P_{vl})} \\
 Q_{vl} &= a_2 \left(P_l^2 + (Q_{2l} - k_M^{-1}U_\delta)^2 \right) \\
 P_{vl} &= a_1 \left(P_l^2 + (Q_{2l} - k_M^{-1}U_\delta)^2 \right) \\
 U_\delta^2 - a_3 U_\delta + a_4 &= 0 \\
 a_3 &= 2Q_{2l} + \frac{100S_{THI}}{U_K \%} \\
 a_4 &= Q_{2l}^2 + P_l^2 + \frac{100(Q_{2l} + Q_{\mu l} - (P_l + 2P_{Cl})tg\varphi_\varepsilon)S_{THI}}{U_K \%} \\
 U_\delta &= k_M \left(\frac{a_3}{2} - \sqrt{\frac{a_3^2}{4} - a_4} \right) \\
 Q_{CD} &= k_{Cl}U_\delta \\
 k_{Cl} &= k_M^{-1}
 \end{aligned} \right\} (2.23)$$

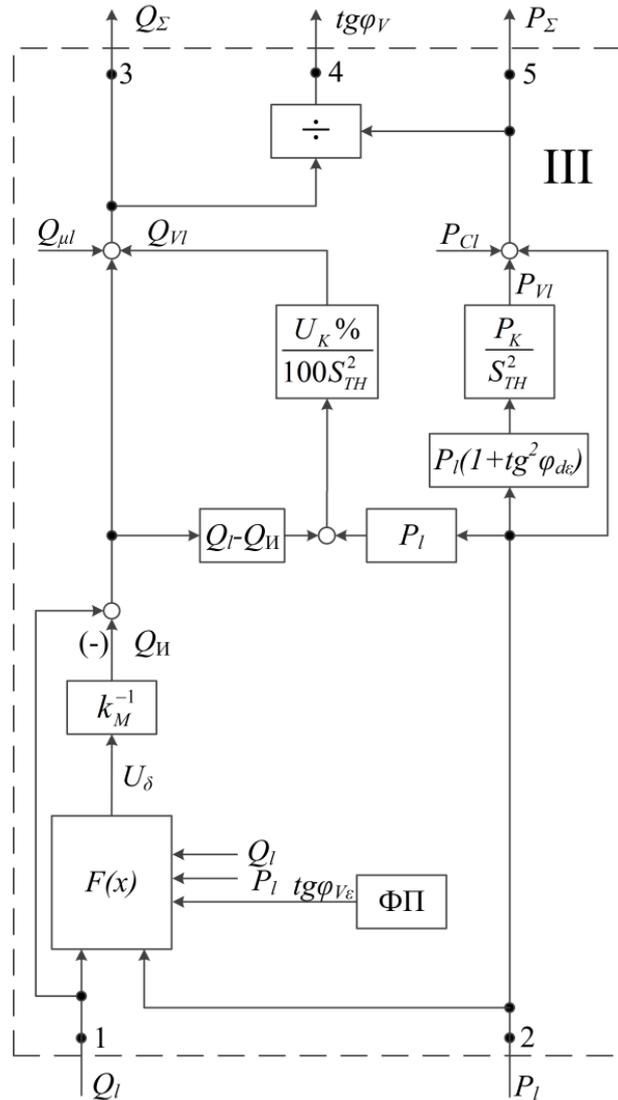


Рисунок 2.15 – Структурная схема системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции

2.5.2. Суточные графики коэффициента реактивной мощности при регулировании на стороне высшего напряжения

Модель САУ коэффициентом реактивной мощности на стороне ВН ТП, реализована в графической среде моделирования MATLAB Simulink.

В математической модели САУ $tg\varphi_V$ (рис. 2.15) управляющим воздействием является заданная величина КРМ на стороне ВН. Возмущающими воздействиями являются изменения величин потребляемой активной и реактивной мощностей, которые для ЭТК НСМ представляют собой графики суточных нагрузок,

полученные на стороне ВН трансформаторов $T_{1.2}$ и $T_{4.2}$ и приведенные на рис. 2.16.

Суточные графики КРМ на сторонах ВН и НН показаны на рис. 2.17.

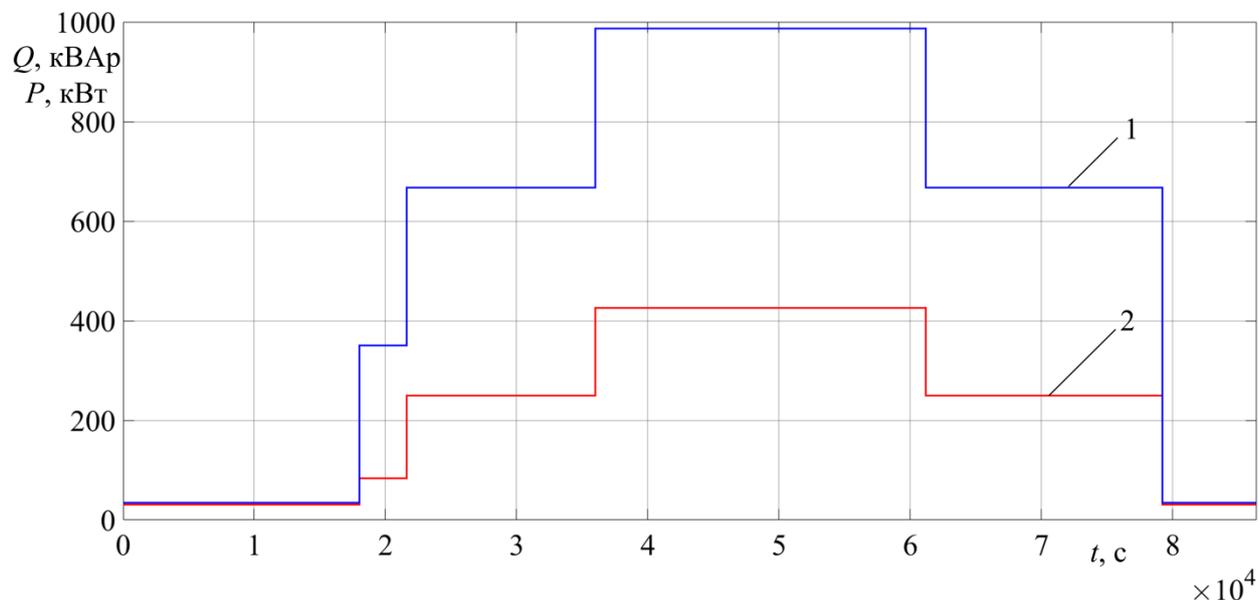


Рисунок 2.16 – Графики суточной нагрузки: 1- активной мощности, 2 –реактивной мощности

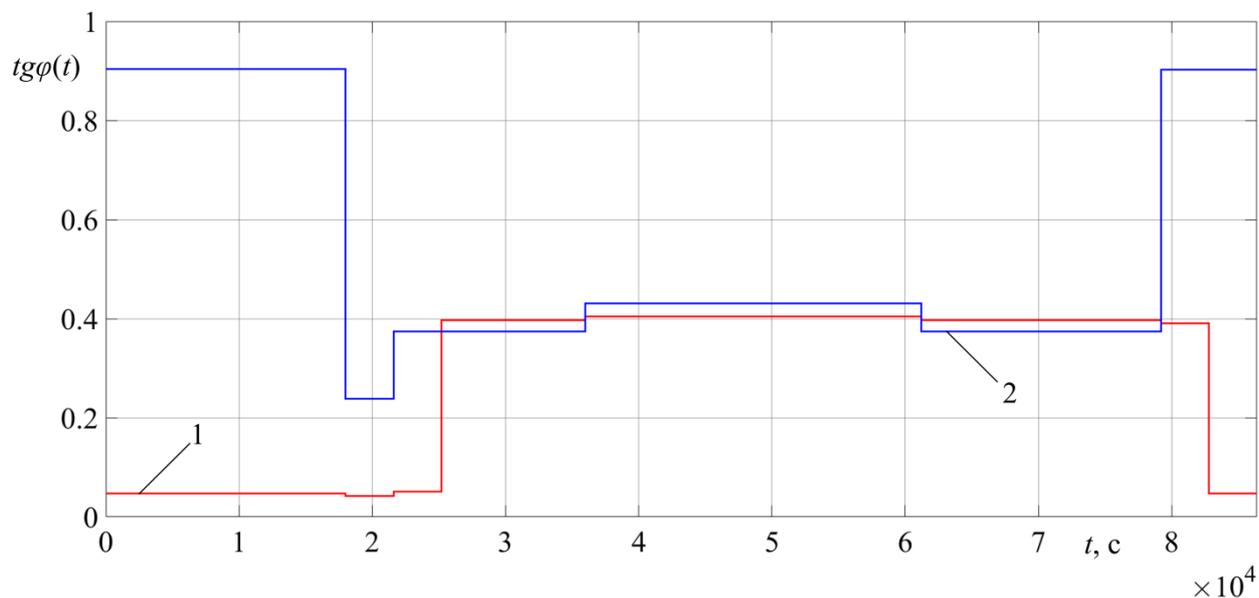


Рисунок 2.17 – Суточные графики КРМ на стороне ВН и НН: 1 – график изменения величины КРМ на стороне ВН трансформатора, 2 – график изменения величины КРМ на стороне НН трансформатора

Из анализа суточных графиков коэффициентов реактивной мощности на сторонах НН и ВН (рис. 2.17) видно, что коэффициент реактивной мощности на стороне НН (график 2) полностью повторяет график коэффициента реактивной

мощности на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности (график 1 рис. 2.10). График 1 показывает изменение величины КРМ на стороне ВН трансформатора. Его форма отражает алгоритм работы САУ КРМ на стороне ВН учитывающий ограничения на предельное значение величины КРМ. Ступенчатая форма графика вызвана тем, что в часы МСН и БСН предельное значение КРМ составляет 0 и 0,4 соответственно. Регулирование коэффициента реактивной мощности на стороне ВН в часы МСН имеет погрешность, не превышающую 5%, а в часы БСН не превышающую 1% от заданной величины коэффициента реактивной мощности 0,4. Следовательно, использование алгоритма управления в функции активной и реактивной мощности потребителей, а также постоянных и переменных потерь в трансформаторах позволяет добиться результатов, близких к предельным значениям КРМ.

2.6. Система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности всего предприятия

2.6.1. Математическая модель САУ КРМ при регулировании на стороне низшего и высшего напряжения трансформаторной подстанции

Управление величиной коэффициента реактивной мощности в ЭТК предприятия можно организовать как на стороне высшего напряжения с использованием САУ $tg\varphi_V$, так и на стороне низшего напряжения с использованием САУ $tg\varphi_d$. Такой подход к регулированию величины коэффициента реактивной мощности позволяет использовать преимущества обеих САУ и компенсировать их недостатки, не меняя структуры. При этом такая система не является системой связанного регулирования, так как изменение активной и реактивной мощности на стороне ВН подстанции, оборудованной САУ $tg\varphi_d$, в таком случае выступает в роли возмущающего воздействия на САУ $tg\varphi_V$.

Функциональная схема данной системы управления [83, 99] представлена на рис. 2.18. Она построена на основе математических моделей (2.17, 2.23) и структурных схем, приведенных на рис. 2.11 и 2.15. При этом цифровые ссылки на рис. 2.11 и 2.15 (1, 2, 3 и 4) соответствуют ссылкам на рис. 2.18, элементы БС1 и БС2 являются элементами суммирования входных величин. Таким образом, на выходе элемента БС1 имеем сумму всех мгновенных действующих значений реактивных мощностей $Q_{r1} - Q_{rm}$ на стороне высшего напряжения подстанций, оборудованных САУ $tg\varphi_d$. На выходе элемента БС2 имеем сумму всех мгновенных значений активных мощностей $P_{r1} - P_{rm}$ на стороне высшего напряжения подстанций, оборудованных САУ $tg\varphi_d$, к которым добавится активная мощность, потребляемая синхронным двигателем.

В математической модели САУ $tg\varphi_V$ и $tg\varphi_d$ (рис. 2.18) в качестве управляющих воздействий выступают сигналы заданного коэффициента реактивной мощности, полученные на выходе формирователей программы изменения КРМ на сторонах НН и ВН. Возмущающим воздействием здесь является изменение величин потребляемой активной и реактивной мощностей, которые для ЭТК НСМ представляют собой графики суточных нагрузок, полученные на стороне НН трансформаторов $T_{1.2}$ и $T_{4.2}$ и представленные на рис. 2.8.

Модель системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности на сторонах НН и ВН ТП реализована в графической среде моделирования MATLAB Simulink. Графики суточного изменения величин коэффициента реактивной мощности ТП 1.1 и ТП 1.2 на стороне ВН представлены на рис. 2.19.

Анализ графиков на рис. 2.19 показывает, что при изменении возмущающего воздействия на САУ $tg\varphi_V$ регулирование КРМ на стороне ВН в часы МСН имеет погрешность, не превышающую 5%, а в часы БСН не превышающую 1% от заданной величины коэффициента реактивной мощности 0,4. Из чего можно сделать вывод, что САУ $tg\varphi_V$ инвариантна к изменению возмущающего воздействия.

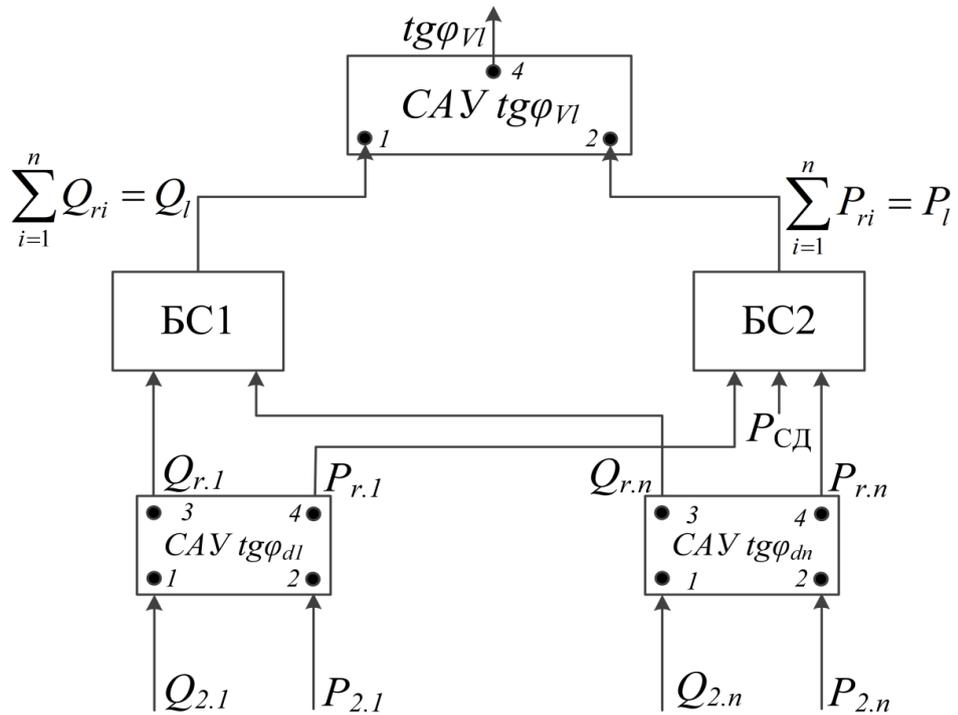


Рисунок 2.18 – Функциональная схема САУ КРМ $tg\varphi_v$ и $tg\varphi_d$

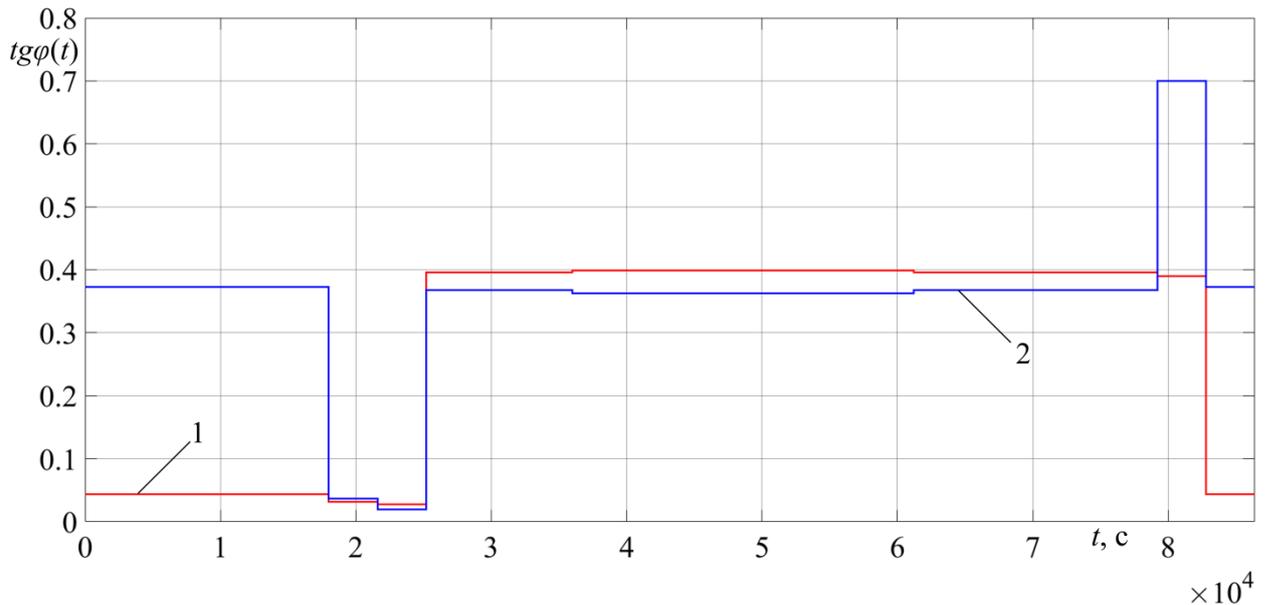


Рисунок 2.19 – Графики суточного изменения величин $tg\varphi_{vI}(t)$ и $tg\varphi_{v6}(t)$ на стороне ВН ТП Т1.1 и Т1.2: 1 – график изменения величины $tg\varphi_{vI}(t)$ на стороне ВН ТП Т1.1, 2 – график изменения величины $tg\varphi_{v6}(t)$ на стороне ВН Т1.2

2.6.2. Математическая модель САУ КРМ всего предприятия

Функциональная схема, показанная на рис. 2.18 справедлива для однолинейной схемы ЭТК, приведенной на рис. 2.1. Однако для однолинейной

схемы ЭТК на рис. 2.2 структурная схема на рис. 2.18 не подходит, хотя является справедливой для трансформаторных подстанций $T_{1.1}$ и $T_{4.1}$. Отличие данных схем в том, что параллельно с трансформаторной подстанцией $T_{1.1}$ подключена трансформаторная подстанция $T_{2.1}$ большой мощности, оборудованная САУ $tg\varphi_d$. Для получения функциональной схемы при такой конфигурации ЭТК предприятия необходимо к функциональной схеме на рис. 2.18 добавить модель трансформаторной подстанции $T_{2.1}$, оборудованной САУ $tg\varphi_d$. Для этого необходимо добавить два блока. Первый – блок суммирования БС1, на выходе которого будет сумма значений потребляемой реактивной мощности ЭТК $Q_{\text{ЭТК}}$, на входе – реактивная мощность, потребляемая подстанциями $T_{1.1}$ и $T_{2.1}$. Второй – блок суммирования БС2, на выходе которого будет сумма потребляемой активной мощности ЭТК $P_{\text{ЭТК}}$, а на входе активная мощность, потребляемая подстанциями $T_{1.1}$ и $T_{2.1}$. Величина коэффициента реактивной мощности ЭТК $tg\varphi_{\text{ЭТК}}$ будет определяться отношением реактивной и активной мощностей ЭТК. После дополнения получим математическую модель ЭТК всего предприятия, представленную в виде функциональной схемы на рис. 2.20.

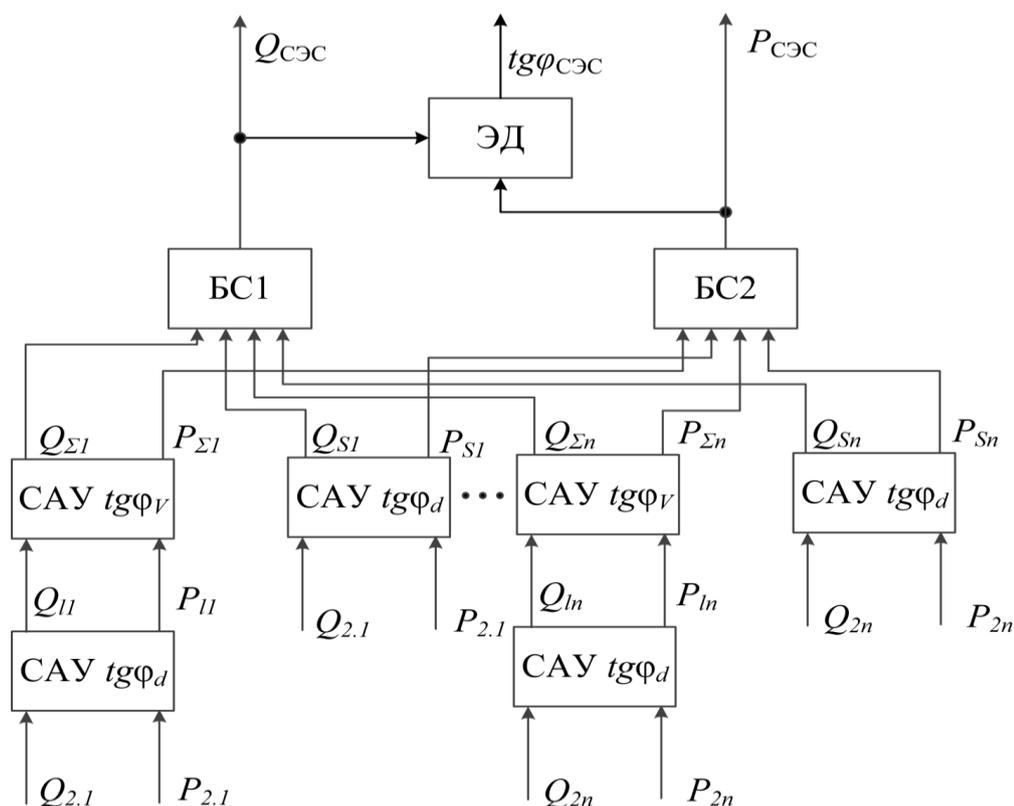


Рисунок 2.20 – Функциональная схема САУ КРМ ЭТК предприятия

Модель системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности всего предприятия реализована в графической среде моделирования MATLAB Simulink. График суточного изменения величины коэффициента реактивной мощности всего предприятия показан на рис. 2.21.

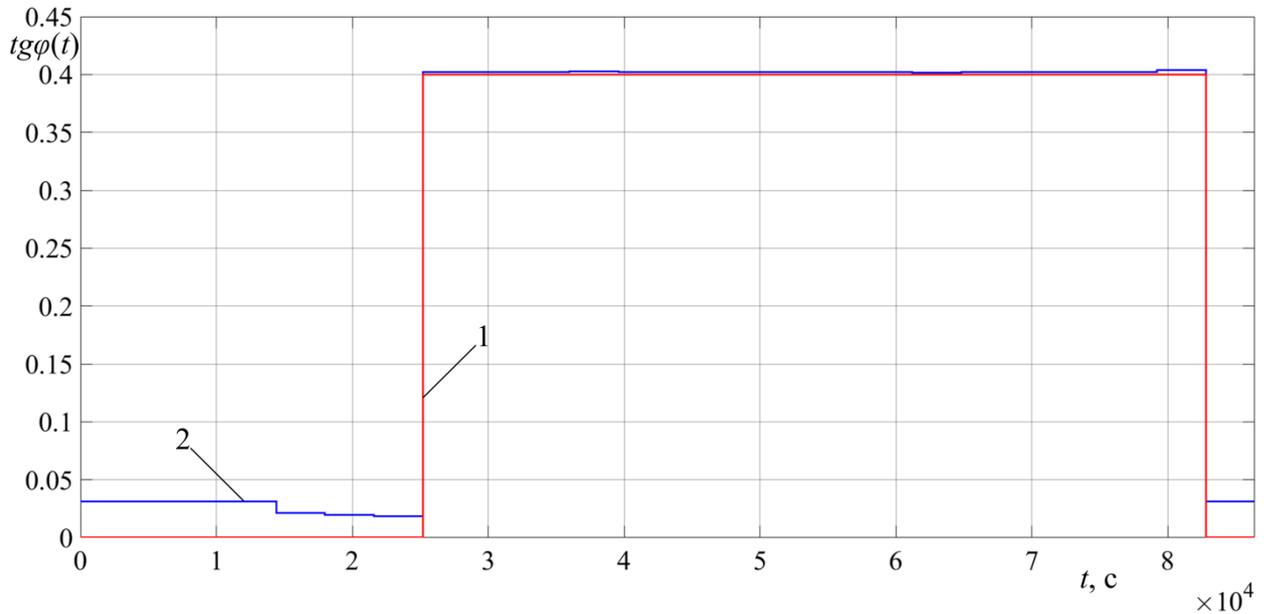


Рисунок 2.21 – График суточного изменения величины КРМ ЭТК: 1 – график предельного значения коэффициента реактивной мощности, 2 – график изменения величины КРМ всего предприятия

Из совместного анализа графиков 1 и 2 на рис. 2.21 видно, что график КРМ ЭТК в часы МСН отличается от графика заданного значения КРМ не более чем на 5%, а в часы БСН отличие составляет менее 1%. Следовательно, графики суточного изменения величины КРМ на стороне ВН и разомкнутые системы управления, реализующие регулирование, не удовлетворяют предельно допустимому значению КРМ. Необходимо использовать замкнутые по величине КРМ системы автоматического управления реактивной мощностью предприятия.

2.7. Выводы по второй главе

1. Из существующих электротехнических комплексов промышленных предприятий с синхронным электроприводом различного назначения выделена их

общая часть, названная обобщенной функциональной схемой электротехнического комплекса. Обобщенная схема включает в себя три типа трансформаторных подстанций: трансформаторную подстанцию без источника реактивной мощности, трансформаторную подстанцию с конденсаторной установкой и трансформаторную подстанцию с синхронным электроприводом как источником реактивной мощности. Основными потребителями активной и реактивной мощности являются асинхронные двигатели различной мощности и различного номинального напряжения. Режим работы электротехнического комплекса предприятия рассматривается с целью управления коэффициентом реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции за счет изменения напряжения возбуждения синхронного двигателя.

2. Разработана математическая модель трансформаторной подстанции без источника реактивной мощности. Доказана необходимость регулирования реактивной мощности в таких подстанциях. Показано, что реактивная мощность полей рассеивания существенно повышает величину коэффициента реактивной мощности.

3. Получена математическая модель трансформаторной подстанции с системой автоматического регулирования коэффициента реактивной мощности на стороне низшего напряжения и конденсаторной батареей в качестве источника реактивной мощности. Показано, что подобные системы автоматического управления инвариантны по отношению к возмущающему воздействию, но при этом коэффициент реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции при одинаковых классах напряжений отличается от заданных значений.

4. Получена математическая модель трансформаторной подстанции с системой автоматического регулирования коэффициента реактивной мощности на стороне высшего напряжения и синхронным двигателем в качестве источника реактивной мощности. Показано, что управление коэффициентом реактивной мощности в часы больших суточных нагрузок имеет погрешность менее 1%, а в часы малых суточных нагрузок менее 5%.

5. На базе математических моделей трансформаторных подстанций без регулирования реактивной мощности, с регулированием на стороне низшего и с регулированием на стороне высшего напряжений трансформатора разработана математическая модель электротехнического комплекса предприятия, как объекта управления коэффициентом реактивной мощности, отличающаяся от известных учетом потерь активной и реактивной мощности в трансформаторах. Состояние этого объекта характеризуется следующими характеристиками: реактивной и активной мощностью, коэффициентом реактивной мощности. Управляющее воздействие – напряжение возбуждения синхронного двигателя. К возмущающим воздействиям относятся изменение активной и реактивной мощностей.

3. ДИНАМИКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В данной главе рассматривается динамика системы управления коэффициентом реактивной мощности при двухконтурной и одноконтурной структуре системы автоматического управления величиной коэффициента реактивной мощности (САУ КРМ ЭТК). Рассмотрение статических моделей, приведенное во второй главе, является достаточным для определения алгоритмов работы задающих устройств, определения величин задающих воздействий и выбора координат, по которым производится управление. Однако рассмотрение статики ЭТК является недостаточным для построения эффективной САУ КРМ ЭТК, так как для настройки регуляторов системы автоматического управления необходимо рассматривать именно динамические модели. Таким образом, появляется необходимость получения математической модели динамики ЭТК как объекта управления коэффициентом реактивной мощности, включающего в себя синхронный, асинхронный электроприводы и силовые трансформаторы.

При построении математической модели динамики ЭТК как объекта управления величиной коэффициента реактивной мощности следует учитывать, что постоянные времени синхронного электропривода значительно превышают постоянные времени остальных элементов ЭТК. После получения математических моделей САУ КРМ ЭТК возникает необходимость их верификации.

3.1. Математическая модель системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности ЭТК в часы малых и больших суточных нагрузок

3.1.1. Математическая модель синхронного двигателя для режима малых отклонений

Математическая модель СД как объекта управления реактивной мощностью в малых приращениях подробно рассмотрена в большом количестве работ отечественных и зарубежных авторов.

В работах [110, 111, 146] используются сложные внутренние нелинейные модели MATLAB Simulink, работа с которыми требует больших вычислительных мощностей, а настройка регуляторов системы автоматического управления математических моделей затруднительна.

Работа [133] описывает математическую модель только статического режима работы синхронного двигателя, полученную в результате анализа схемы замещения и не может быть использована для настройки регуляторов САУ КРМ ЭТК.

В работах [21, 37, 84] показана математическая модель синхронного электропривода как объекта управления реактивной мощностью, вырабатываемой синхронным двигателем с выходной координатой в виде реактивной мощности. Управляющим воздействием является изменение напряжения возбуждения, а возмущающие воздействия – изменение момента нагрузки на валу двигателя и колебания напряжения сети. Предложенные в этих работах математические модели являются идейным продолжением моделей, полученных в работе [19]. Таким образом, исходя из задачи построения системы управления синхронным электроприводом можно сделать вывод, что математическая модель, полученная в работе [37], позволяет описать динамические свойства синхронного двигателя в виде составной части модели ЭТК при управлении реактивной мощностью.

Данная математическая модель с достаточной точностью описывает процесс регулирования реактивной мощности синхронного двигателя в динамике.

Ее особенностью является то, что при синтезе системы управления двигателем необходимо учитывать два возмущающих воздействия: приращение момента статической нагрузки на валу двигателя $\Delta m(p)$ и колебания напряжения питания ΔU_1 .

При этом нестабильность напряжения сети ΔU_1 в условиях малых приращений не оказывает существенного влияния на реактивную мощность СД. В условиях анализа системы «в большом» данное возмущающее воздействие приведет к срабатыванию релейной защиты по напряжению, отключению двигателя от сети и прекращению работы САУ.

Если пренебречь колебаниями напряжения ΔU_1 , то математическая модель СД примет вид

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_f(p) &= \frac{1}{T_f'p + 1} \left(\frac{\Delta U_f(p)}{R_f} - W_4(p) \Delta \Theta(p) \right) \\ \Delta \Theta(p) &= W_1(p) \left(\frac{k_1 \Delta E_q(p)}{E_{q0}} + \frac{k_2 \Delta P(p)}{P_{CM}} \right) \\ E_{q0} &= x_{ad} I_{f0} \\ \Delta E_q(p) &= x_{ad} \Delta I_f(p) = \frac{x_{ad} \Delta U_f(p)}{R_f} \\ \Delta Q(p) &= k_4 \Delta \Theta(p) + k_5 \Delta E_q(p) \\ \Delta P(p) &= k_6 \Delta m(p) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где ΔI_f – приращение тока возбуждения; T_f – постоянная времени обмотки возбуждения; R_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; $\Delta \Theta$ – приращение внутреннего угла СД; E_q – ЭДС СД по оси q ; x_{ad} – индуктивное сопротивление продольной реакции якоря; ΔQ – приращение реактивной мощности СД; ΔP – приращение активной мощности СД; P_{CM} – номинальная активная мощность синхронного двигателя; Δm – приращение момента нагрузки на валу СД.

В математической модели приняты следующие обозначения

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1} \quad (3.2)$$

где

$$T_1 = \sqrt{\frac{J}{A_1}}; \quad \xi = \frac{m_{кр} M_H}{2\omega_{мн} \sqrt{A_1 J}}; \quad A_1 = p_m m_{см} M_H \cos \Theta_0, \quad (3.3)$$

$$W_4(p) = T_{д1} p; \quad T_{д1} = \frac{3U_H X_{ад} \sin \Theta_0}{2\omega R_f X_d}, \quad (3.4)$$

где $m_{кр}$ – перегрузочная способность СД; M_H – номинальный момент на валу СД; J – сумма момента инерции ротора двигателя и приведенного к валу двигателя момента инерции механизма; p_m – число пар полюсов двигателя; $s_{кр}$ – критическое скольжения пусковой обмотки двигателя; $\omega_{мн}$ – номинальное значение угловой скорости СД; $m_{см}$ – относительный момент СД; Θ_0 – угол нагрузки СД при $\cos \varphi_{СД} = 1$; U_H – номинальное напряжение питания СД; $X_{ад}$ – линейное индуктивное сопротивление продольной реакции якоря; $X_{ад} = \sqrt{3}x_{ад}$ $X_d = \sqrt{3}x_d$; x_d – синхронное индуктивное сопротивление СД, $T_{д1}$ – постоянная времени демпферной обмотки.

Коэффициенты, приведенные в (3.1) получены по следующим выражениям:

$$k_1 = -tg \Theta_0; \quad k_2 = \frac{1}{\cos \Theta_0}; \quad k_3 = \frac{U_H E_{q0}}{x_d}; \quad k_4 = -\frac{U_H E_{q0}}{x_d}; \quad k_5 = \frac{U_H \cos \Theta_0}{x_d}.$$

Таким образом получена математическая модель синхронного двигателя как объекта управления реактивной мощностью (3.1). На рис.3.1 приведена структурная схема СД, как объекта управления по каналу напряжения возбуждения с возмущающим воздействием в виде изменения момента нагрузки.

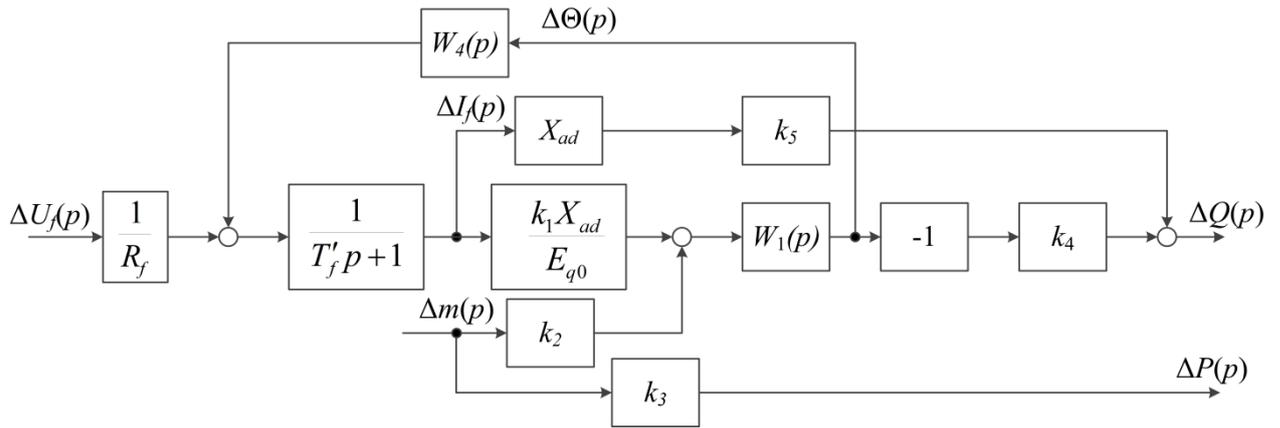


Рисунок 3.1 – Структурная схема синхронного двигателя как объекта управления

3.1.2. Определение параметров синхронного двигателя

В ЭТК НСМ используется неявнополюсный синхронный двигатель марки СТД-630-23УХЛ4 со следующими номинальными данными: полная мощность $S_H = 735$ кВА; активная мощность $P_H = 630$ кВт; $\cos \varphi_H = 0,9$ опережающий; номинальная угловая скорость вращения $\omega_H = 314$ рад/с; кратность пускового тока $i_H = 5,66$; кратность синхронного момента $m_{см} = 1,61$; кратность максимального асинхронного момента $m_{кр} = 2,08$; момент инерции ротора $J_p = 13$ кг·м²; момент инерции механизма $J_{мех} = 398$ кг·м²; число пар полюсов $p_m = 1$; $U_H = 6,3$ кВ; максимальное напряжение обмотки возбуждения $U_{f\max} = 29$ В; максимальный ток возбуждения $I_{f\max} = 245$ А; номинальный коэффициент полезного действия $\eta_H = 96,1$ %; постоянная времени обмотки возбуждения без учета реакции якоря $T_{j0} = 2,51$ с; с учетом реакции якоря $T'_f = 0,314$ с [64, 79].

Определение номинальных значений основных параметров двигателя выполним в соответствии с выражениями:

- индуктивное номинальное сопротивление

$$x_H = \frac{U_H^2}{S_H} \rightarrow \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{735 \cdot 10^3} = 48,98 \text{ Ом};$$

- номинальный момент

$$M_H = 1000 \frac{P_H}{\omega_H} \rightarrow \frac{630 \cdot 1000}{314} = 2006 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- ток статора

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_H} \rightarrow \frac{735}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 70,8 \text{ А};$$

- внутренний угол машины

$$\Theta_H = \arcsin m_{cm}^{-1} \rightarrow \arcsin 1,61^{-1} = 38,3^\circ.$$

Значения параметров передаточной функции (3.2) определим по формулам (3.3, 3.4) при различных величинах момента инерции на валу синхронного электродвигателя. Для удобства представим данные в табличном виде.

Таблица 3.1 – Механическая постоянная времени и декремент затухания синхронного двигателя СТД-630-23УХЛ4 при разных моментах инерции

$J, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	21,3	124,8	281,5	390
$T_1, \text{ с}$	0,09	0,22	0,33	0,39
ξ	0,57	0,24	0,15	0,13

Индуктивное сопротивление x_d можно определить аналитически, пользуясь справочными данными [64, 91]. Однако аналитические способы довольно трудоемки, а данные в справочной литературе отличаются друг от друга. Так, например, в [64] и [91] даются разные значения m_{cm} для одного двигателя.

Из векторных диаграмм номинального режима и режима с коэффициентом мощности равным 1 можно определить оставшиеся неизвестные параметры. Векторную диаграмму строим с использованием выражения

$$\dot{U} = \dot{E}_q + \sqrt{3} \dot{I} x_d.$$

Векторная диаграмма для номинального режима двигателя ($U_H = 6,3 \text{ кВ}$; $\Theta_H = 38,3^\circ$; $\varphi_H = 25,5^\circ$), построенная в относительных единицах, представлена на рис. 3.2

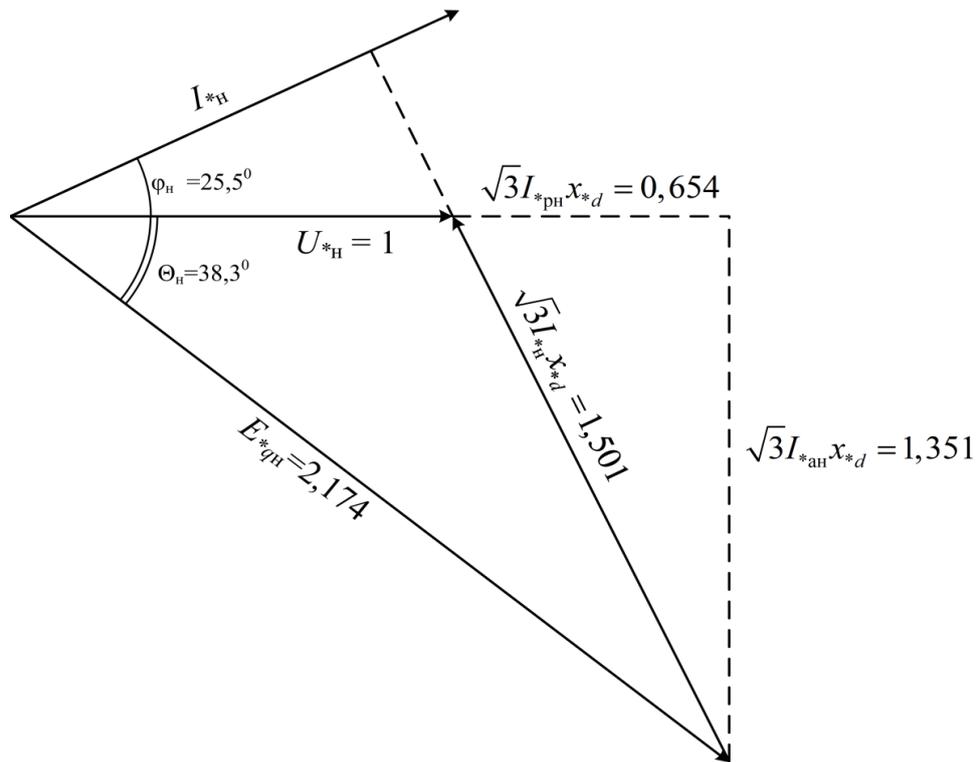


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма номинального режима работы СТД-630

Из векторной диаграммы определяем индуктивное сопротивление синхронного двигателя в продольной оси

$$x_{*d} = \frac{\sqrt{3}I_{*н}x_{*d}}{\sqrt{3}I_{*н}} \rightarrow \frac{\sqrt{3} \cdot 1,501}{\sqrt{3}} = 1,501,$$

$$x_d = x_{*d} \cdot x_n = 73,51 \text{ Ом.}$$

Номинальное значение противо-ЭДС двигателя полученное из векторной диаграммы $E_{*qn} = 2,174$. Тогда

$$E_{qn} = E_{*qn} \cdot U_n \rightarrow 2,174 \cdot 6,3 = 13,044 \text{ кВ.}$$

При режимах работы синхронного двигателя, отличающихся от номинального, параметры двигателя можно определять аналогичным образом с учетом допущения, что двигатель работает при неизменной нагрузке и активная составляющая ЭДС продольной реакции якоря $\sqrt{3}I_{*ан}x_{*d} = 1,351$ известна.

Остальные параметры математической модели определим из векторной диаграммы (рис. 3.3) при $\varphi = 0^0$. При этом направление векторов $U_{*н}$ и $I_{*н}$

совпадают, величина $\sqrt{3}I_{*н}x_{*d}$ определяется только активной составляющей тока статора, $\sqrt{3}I_{*ан}x_{*d} = 1,351$.

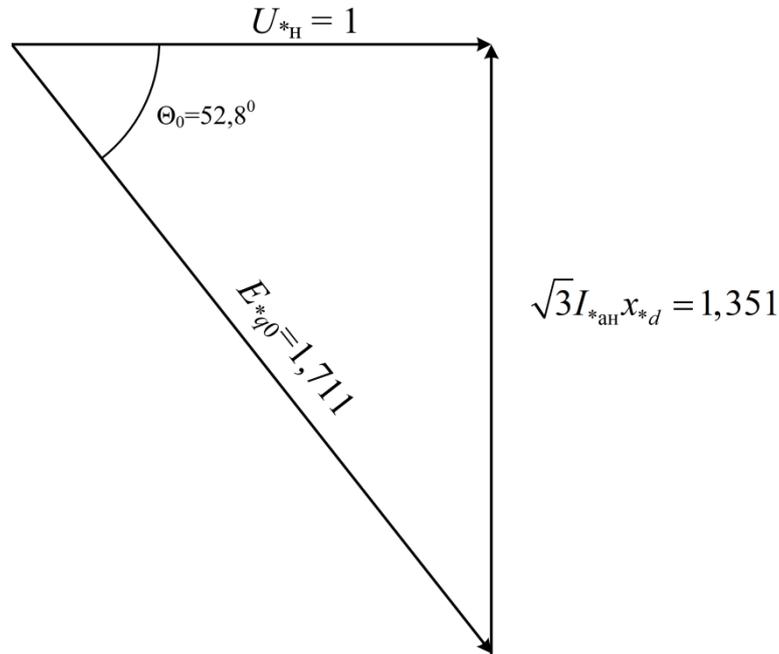


Рисунок 3.3 – Векторная диаграмма работы СТД-630 при $\cos\varphi = 1$

Из векторной диаграммы получим $E_{q0} = 10,264$ кВ, $\Theta_0 = 52,8^\circ$.

Индуктивное сопротивление продольной реакции якоря $x_{*ад}$

$$x_{*ад} = x_{*d} - x_{*σ}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора [66]

$$x_{*σ} = x_{*дп}'' - k,$$

где коэффициент магнитной проводимости рассеяния $k = 0,0125$.

Величина сверхпереходного сопротивления по продольной оси при пуске двигателя $x_{*дп}''$ является справочной и может быть определена по [64] и составляет $x_{*дп}'' = 0,1468$. Следовательно, $x_{*σ} = 0,1343$.

Таким образом, значение индуктивного сопротивления продольной реакции якоря $x_{*ад} = 1,43$ или $x_{ад} = 70,04$ Ом. Линейное индуктивное сопротивление продольной реакции якоря $X_{ад} = 121,17$ Ом.

Далее находим коэффициенты модели k_1, k_2, k_4, k_5, k_6 и постоянную времени $T_{д1} = 0,217$ с из (3.4). Значение коэффициентов запишем в таблицу.

параметрах передаточной функции (3.2) $T_1 = 0,09$ с, $\xi = 0,57$ и $T_1 = 0,22$ с, $\xi = 0,24$ изображены на рис. 3.5 и 3.6 соответственно.

Переходные процессы по приращению реактивной мощности и внутреннего угла по возмущающему воздействию – моменту нагрузки $\Delta m(t) = 200$ Н·м при $T_1 = 0,09$ с, $\xi = 0,57$ и $T_1 = 0,22$ с, $\xi = 0,24$ изображены на рис. 3.7 и 3.8 соответственно.

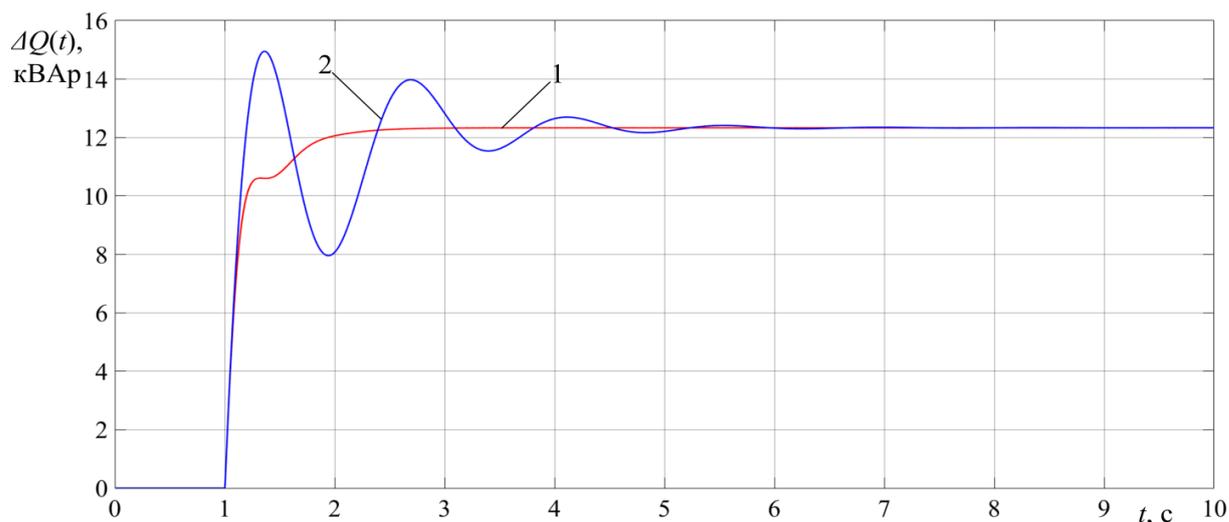


Рисунок 3.5 – Графики переходных процессов по приращению РМ по управляющему воздействию $\Delta U_f(t) = 0,1$ В: 1 – $T_1 = 0,09$ с, $\xi = 0,57$; 2 – $T_1 = 0,22$ с, $\xi = 0,24$

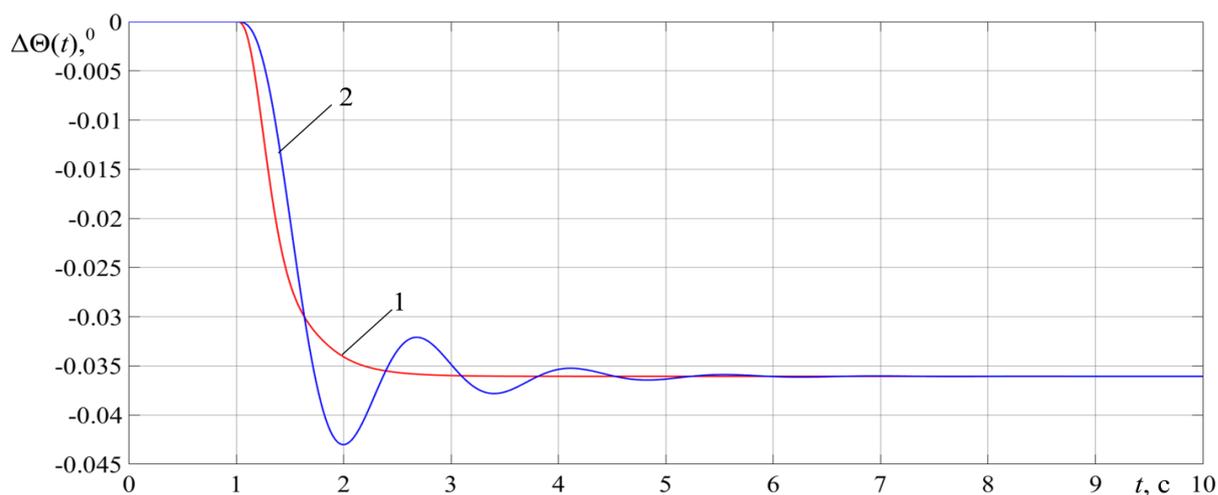


Рисунок 3.6 – Графики переходных процессов по приращению угла нагрузки по управляющему воздействию $\Delta U_f(t) = 0,1$ В: 1 – $T_1 = 0,09$ с, $\xi = 0,57$; 2 – $T_1 = 0,22$ с, $\xi = 0,24$

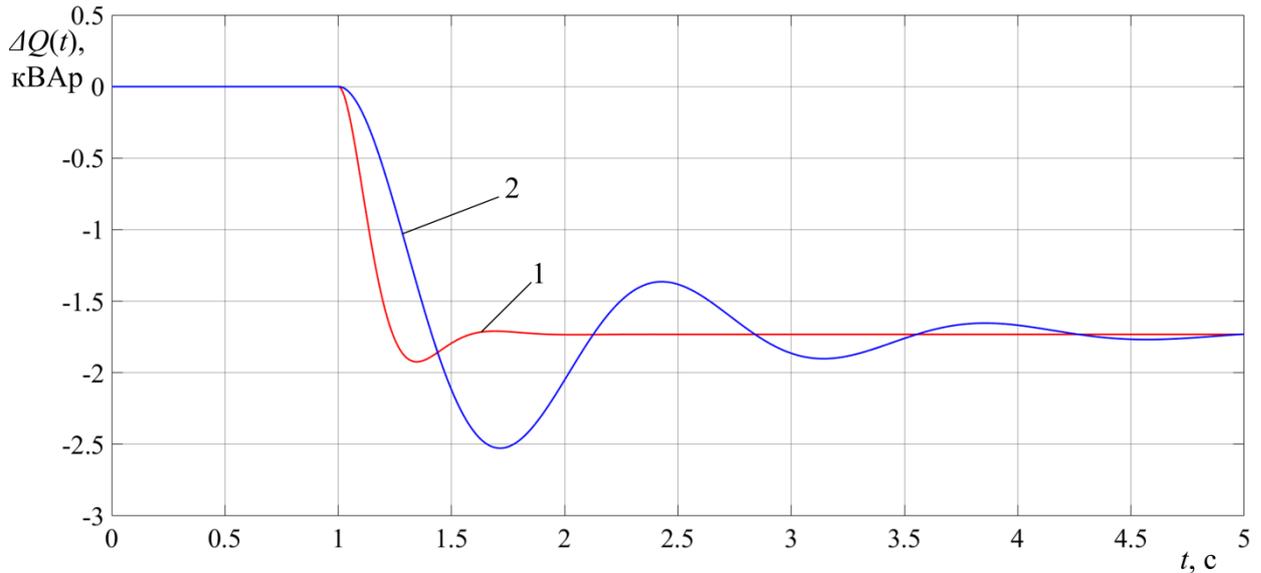


Рисунок 3.7 – Графики переходных процессов по приращению реактивной мощности по возмущающему воздействию $\Delta m(t) = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$: 1 – $T_1 = 0,09 \text{ с}$, $\xi = 0,57$; 2 – $T_1 = 0,22 \text{ с}$, $\xi = 0,24$

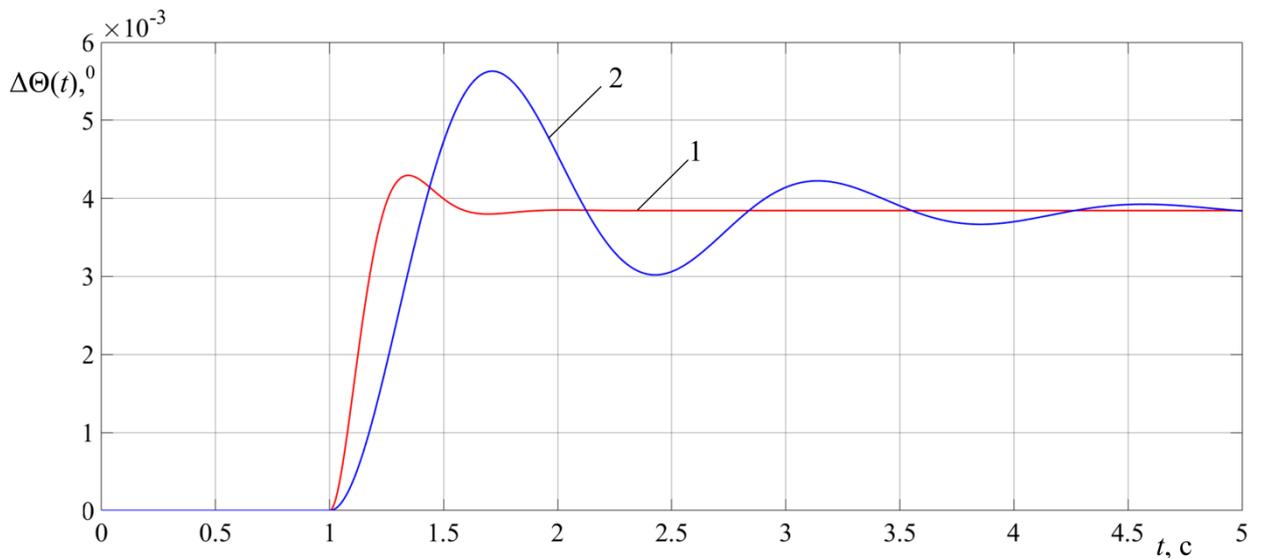


Рисунок 3.8 – Графики переходных процессов по приращению угла нагрузки по возмущающему воздействию $\Delta m(t) = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$: 1 – $T_1 = 0,09 \text{ с}$, $\xi = 0,57$; 2 – $T_1 = 0,22 \text{ с}$, $\xi = 0,24$

Из анализа переходных процессов по управляющему (рис. 3.5, 3.6) и возмущающему (рис. 3.7, 3.8) воздействиям следует, что с увеличением момента инерции, приведенного к валу двигателя, растет постоянная времени, а коэффициент затухания падает, что приводит к увеличению времени переходного процесса с $t_{\text{пн1}}=1\text{с}$ до $t_{\text{пн2}}=3\text{с}$ и перерегулирования с 0% до 16% для управляющего

воздействия. Для возмущающего воздействия возрастает время переходного процесса с $t_{\text{пн1}}=0,7\text{с}$ до $t_{\text{пн2}}=3\text{с}$ и перерегулирование с 5% до 33%.

3.1.4. Обобщенная математическая модель электротехнического комплекса с синхронным электроприводом

Для анализа динамики и синтеза САУ КРМ необходимо разработать математическую модель обобщенного ЭТК, как объекта управления коэффициентом реактивной мощности в динамике. В структуру ЭТК входят трансформаторные подстанции с источниками реактивной мощности в виде конденсаторных установок и синхронных двигателей.

Математические модели статического режима трансформаторных подстанций с источниками реактивной мощности в виде конденсаторных батарей и синхронного двигателя представлены системами уравнений (2.17) и (2.23) соответственно.

Для получения математической модели САУ КРМ с источником реактивной мощности в виде конденсаторной батареи в малых приращениях, в математической модели (2.17) примем постоянные потери мощности в трансформаторах равными нулю, тогда получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_K(p) &= k_C \Delta U_\delta(p) \\ \Delta Q_K(p) &= \Delta Q_2(p) - \text{tg} \varphi_{d\varepsilon} \Delta P_2(p) \\ \Delta P_V(p) &= a_1 (1 + \text{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) \Delta P_2^2(p) \\ \Delta Q_V(p) &= a_2 (1 + \text{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) \Delta P_2^2(p) \\ \Delta \text{tg} \varphi_d(p) &= \frac{\Delta Q_2(p) - \Delta Q_K(p)}{\Delta P_2(p)} \\ \Delta \text{tg} \varphi_V(p) &= \frac{\text{tg} \varphi_{d\varepsilon} \Delta P_2(p) + \Delta Q_V(p)}{\Delta P_2(p)_2 + \Delta P_V(p)} = \frac{\Delta Q_S(p)}{\Delta P_S(p)} \end{aligned} \right\} (3.5)$$

где $\Delta Q_K(p)$ – приращение реактивной мощности на конденсаторной установке; k_C – коэффициент передачи САУ реактивной мощностью; $\Delta U_\delta(p)$ – сигнал задания

САУ конденсаторной установки; $\Delta Q_2(p)$, $\Delta P_2(p)$ – приращения реактивной и активной мощности асинхронных двигателей, подключенных к подстанции соответственно; $\Delta Q_V(p)$, $\Delta P_V(p)$ – приращения переменных потерь мощности в трансформаторе ТП; $tg\varphi_{d\varepsilon}$ – заданное значение величины КРМ на стороне низшего напряжения трансформаторной подстанции; $\Delta tg\varphi_V$, $\Delta tg\varphi_d$ – приращение величины КРМ на сторонах высшего и низшего напряжения ТП соответственно.

Аналогично для системы уравнений (2.23), представляющей собой САУ КРМ с источником реактивной мощности в виде синхронного двигателя получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta tg\varphi_V(p) &= \frac{\Delta Q_l(p) + \Delta Q_{V(n+1)}(p) - \Delta Q_{CD}(p)}{\Delta P_{l1}(p) + \Delta P_{V(n+1)}(p)} \\ \Delta P_{l1}(p) &= \Delta P_l(p) + \Delta P_{CD}(p) \\ \Delta Q_{V(n+1)}(p) &= a_{2l} \left(\Delta P_{l1}^2(p) + (\Delta Q_l(p) - \Delta Q_{CD}(p))^2 \right) \\ \Delta P_{V(n+1)}(p) &= a_{1l} (1 + tg^2\varphi_{d\varepsilon}) \Delta P_{l1}^2(p) \\ \Delta Q_\Sigma(p) &= \Delta Q_l(p) + \Delta Q_{V(n+1)}(p) - \Delta Q_{CD}(p) \\ P_\Sigma(p) &= \Delta P_{V(n+1)}(p) + \Delta P_{l1}(p) \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

где $\Delta tg\varphi_V(p)$ – величина КРМ на стороне ВН подстанции; $\Delta Q_l(p)$, $\Delta P_l(p)$ – реактивная и активная мощность нагрузки, подключенной к подстанции; $\Delta Q_V(p)$, $\Delta P_V(p)$ – переменные потери реактивной и активной мощности в трансформаторах ТП; $\Delta Q_{CD}(p)$ – реактивная мощность, вырабатываемая синхронным двигателем; $\Delta P_{CD}(p)$ – активная мощность, потребляемая синхронным двигателем.

Из однолинейной обобщенной функциональной схемы ЭТК (рис. 2.3) значения реактивной и активной мощности на сторонах ВН САУ $tg\varphi_d$ (3.5) и НН САУ $tg\varphi_V$ (3.6) будут равны.

Поскольку в состав модели (3.6) входит синхронный двигатель, то приращение реактивной мощности, отдаваемой им в сеть, есть не что иное, как приращение реактивной мощности синхронного двигателя в математической модели (3.1).

Таким образом, математическая модель ЭТК промышленного предприятия с синхронным электроприводом в малых приращениях состоит из систем уравнений (3.1), (3.5) и (3.6).

Структурная схема системы управления, соответствующая математической модели показана на рис. 3.9.

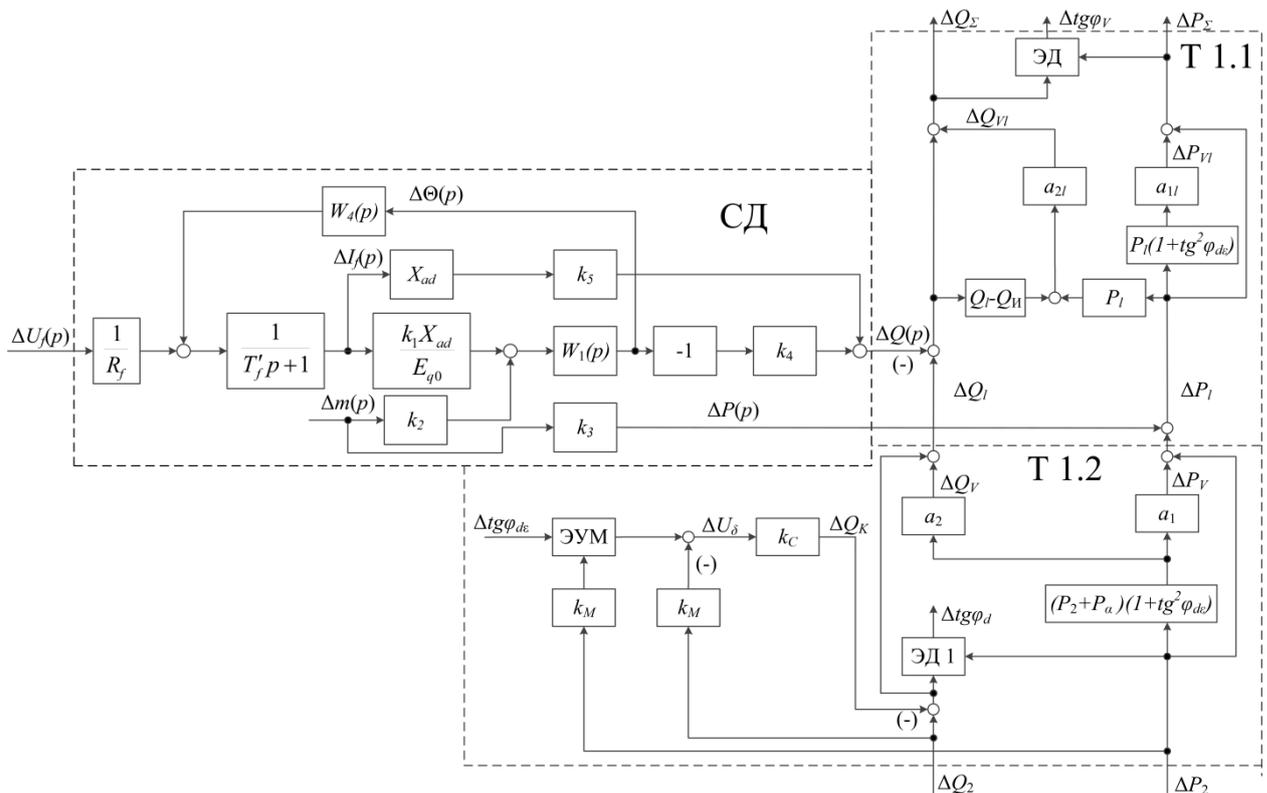


Рисунок 3.9 - Структурная схема системы управления ЭТК промышленного предприятия с синхронным электроприводом

На схеме: СД – модель синхронного двигателя (3.1); Т 1.1 – модель трансформаторной подстанции, оснащенной САУ КРМ на стороне ВН трансформатора (3.6); Т 1.2 – модель трансформаторной подстанции, оснащенной САУ КРМ на стороне НН трансформатора (3.5).

Математические модели динамики синхронного двигателя, САУ КРМ на стороне НН трансформатора, САУ КРМ на стороне ВН трансформатора как отдельных элементов обобщенного ЭТК с синхронным электроприводом связаны между собой с помощью обобщённой функциональной схемы (рис. 2.3) по общим выходным координатам и возмущающим воздействиям. При этом структурная

схема (рис. 3.9) является моделью трансформаторных подстанций Т 1.2 и Т 1.1 (рис. 2.2) для частного случая обобщённой функциональной схемы (рис. 2.3).

3.1.5. Переходные процессы в ЭТК с синхронным электроприводом

Обобщенная математическая модель ЭТК с синхронным электроприводом полученная из выражений (3.1-3.6) реализована в программной среде MATLAB Simulink.

Переходный процесс по КРМ на стороне ВН по управляющему воздействию $\Delta U_f(t)=0,1$ В при постоянном значении потребляемой активной мощности $\Delta P_2(t) = 25$ кВт показан на рис.3.10.

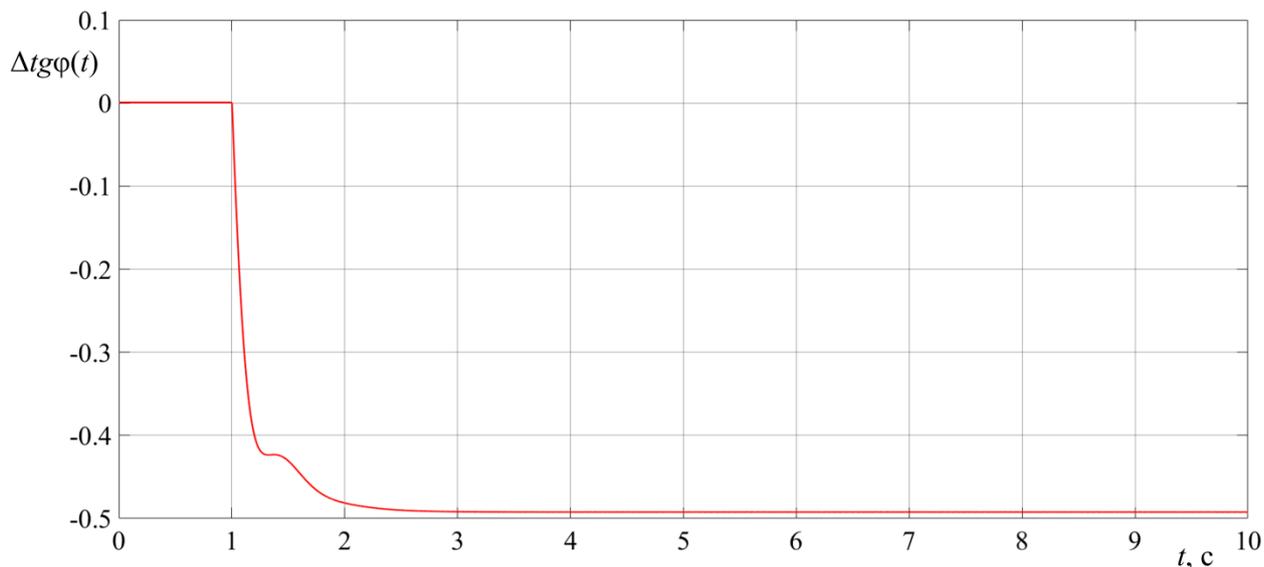


Рисунок 3.10 - График переходного процесса КРМ ЭТК на стороне ВН по управляющему воздействию $\Delta U_f(t) = 0,1$ В и $\Delta P_2(t) = 25$ кВт

Из анализа графика можно определить показатели качества переходного процесса величины КРМ на стороне ВН. Время переходного процесса составляет 1с., перерегулирование равно 0%. При этом график имеет неравномерную скорость изменения коэффициента мощности, что напрямую связано с динамикой синхронного двигателя. Колебания реактивной мощности в ЭТК, которые проявляются в виде вариации скорости изменения КРМ, оказывают негативное воздействие на устойчивость ЭТК.

Для задания монотонного характера изменения КРМ ЭТК при изменении напряжения возбуждения СД необходимо синтезировать систему управления величиной КРМ. Также для упрощения анализа САУ КРМ ЭТК и общности описания физического процесса изменения активной и реактивной мощности асинхронного двигателя (АД) требуется получить модель приращения активной и реактивной мощности в зависимости от приращения скольжения.

3.2. Определение параметров схемы замещения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при отсутствии информации

Сдерживающим фактором при построении систем автоматического управления коэффициентом реактивной мощности является отсутствие простых и эффективных методов расчета параметров схемы замещения трехфазных асинхронных двигателей, необходимых для определения изменения активной и реактивной мощности при пуске двигателя и изменении его скольжения, установки параметров защит от различного рода перегрузок и коротких замыканий.

Для асинхронных двигателей значения параметров схемы замещения можно определить из справочной литературы [7], данные в которой не всегда точны. Таким образом, возникает необходимость определения параметров схемы замещения аналитическими или экспериментальными методами.

3.2.1. Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя по неполным данным

Существуют различные методы опытного определения параметров асинхронных двигателей разработанные на основе: частотных характеристик [109], алгоритмов фазы-логики [124], нейронных сетей [135] и генетических алгоритмов [136]. Их основной недостаток - невозможность использования на этапе аналитических исследований, когда отсутствует рассматриваемый

двигатель, так как они подразумевают проведение исследования физической модели.

Известен метод идентификации по каталожным данным. Входными параметрами для расчетов являются номинальные значения мощности на валу $P_{2н}$, напряжение U_n , частота вращения n_n или скольжение s_n , коэффициенты полезного действия η_n и мощности $\cos\varphi_n$, значение кратности максимального момента $m_k = M_k/M_n$. Использование данного метода возможно только при наличии каталога на рассматриваемую серию двигателей.

В методах, приведенных в работах [5, 40, 41], активное сопротивление статора R_1 , индуктивное сопротивление короткого замыкания X_k и приведённое активное сопротивление ротора R_2' при номинальном скольжении s_n определяют из решения системы двух уравнений для электромагнитной мощности при номинальном и критическом скольжении при фиксированном отношении сопротивлений R_1/R_2' для снижения числа неизвестных с трех до двух. Причем выбор указанного соотношения недостаточно обоснован, что приводит к появлению недопустимо большой погрешности.

В работах [42-46] с целью уменьшения погрешности вычислений к уравнениям электромагнитной мощности при номинальном и критическом скольжениях добавлено уравнение реактивной мощности из [65]. Основным недостатком этого метода является его сложность, заключающаяся в необходимости решения системы из трех нелинейных уравнений с тремя неизвестными.

Кроме того, во всех вышеперечисленных работах эффективность применяемых методов расчетов оценивается сравнением результатов вычислений с данными контрольных двигателей, которые выбраны без достаточных обоснований. Причем, при выборе двигателей, справочные данные которых не точны, погрешность расчетов будет обусловлена погрешностью самих данных, а не погрешностью используемого метода.

Из Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя получим выражение номинальной электромагнитной мощности

$$P_{\vartheta}(s_H) = \frac{U_H^2 \frac{R_2'}{s_H}}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H}\right)^2 + X_K^2}. \quad (3.7)$$

Выразим реактивную мощность рассеяния в номинальном режиме через активное сопротивление статора, ротора и полное индуктивное сопротивления короткого замыкания

$$Q_2(s_H) = \frac{s_H X_K P_{\vartheta}(s_H)}{R_2'}, \quad (3.8)$$

и кратность максимального момента

$$Q_2(s_H) = \frac{P_{2H}}{2m_K}. \quad (3.9)$$

Максимальная электромагнитная мощность

$$m_K P_{\vartheta}(s_H) = \frac{U_H^2}{2\left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2}\right)}. \quad (3.10)$$

Тогда сопротивления можно определить из решения системы уравнений

$$R_1^2 + \frac{R_2'^2}{s_H^2} - \frac{a_1}{s_H} R_2' + \frac{2}{s_H} R_1 R_2' + X_K^2 = 0; \quad (3.11)$$

$$R_1 = a_2 - a_3 X_K^2; \quad (3.12)$$

$$R_2' = a_4 X_K, \quad (3.13)$$

где $a_0 = \frac{\eta_H + 0,016}{\eta_H(1-s_H)}$, $a_1 = \frac{U_H^2}{P_{\vartheta}(s_H)}$; $a_2 = \frac{a_1}{4m_K}$; $a_3 = \frac{m_K}{a_1}$; $a_4 = 2a_0 s_H m_K$.

Уравнение (3.11) получено из (3.7), уравнение (3.12) из (3.10), а уравнение (3.13) из совместного рассмотрения выражений (3.7) - (3.9).

Систему уравнений (3.11) - (3.13) можно решить методом итерации. Для этого на первом шаге при условии, что в первом приближении $R_1 = R_2'$ из уравнения (3.11)

$$X_{к.1} = \frac{a_1 a_4}{s_H (1 + b_1 a_4^2)}, \quad (3.14)$$

где

$$b_1 = 1 + \frac{1}{s_H^2} + \frac{2}{s_H}.$$

На первом шаге $R_1 = 0$, тогда из (3.11) получаем

$$X_{к1} = \frac{a_1 a_4 s_H}{a_4^2 + s_H^2}. \quad (3.15)$$

Последующий алгоритм расчета, начиная со второго шага, состоит из определения отношения сопротивлений по приближенной формуле

$$\varepsilon_i = \frac{R_1^{(i)}}{R_2^{(i)}} = \frac{a_2 - a_3 X_{к(i-1)}^2}{a_4 X_{к(i-1)}}, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (3.16)$$

и после подстановки

$$\begin{aligned} R_1^{(i)} &= \varepsilon_i R_2^{(i)}, \\ R_2^{(i)} &= a_4 X_{ки}, \quad i = 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (3.17)$$

в уравнение (3.11), где $R_1 = R_1^{(i)}$, $R_2' = R_2^{(i)}$, $X_к = X_к^{(i)}$, получаем рекуррентную формулу для вычисления индуктивного сопротивления короткого замыкания

$$X_{ки} = \frac{a_1 a_4}{s_H (1 + b_i a_4^2)}, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (3.18)$$

где

$$b_i = \varepsilon_i^2 + \frac{2\varepsilon_i}{s_H} + \frac{1}{s_H^2}, \quad i = 2, 3, \dots, n.$$

На последнем шаге активные сопротивления статора и ротора определяются по формулам

$$\begin{aligned} R_1 &= a_2 - a_3 X_{кн}^2; \\ R_2' &= a_4 X_{кн}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

После нахождения активного сопротивления статора, полного индуктивного сопротивления короткого замыкания и приведённого активного сопротивления ротора определим индуктивное сопротивление ветви намагничивания

$$X_{\mu} = \frac{U^2}{Q_{\mu}} - X_1, \quad (3.20)$$

и реактивную мощность этой ветви

$$Q_{\mu} = \frac{P_{2H}}{\eta} \operatorname{tg} \varphi_H - Q_{2H}, \quad (3.21)$$

где X_1 – индуктивное сопротивление рассеяния, $\operatorname{tg} \varphi_H$ – номинальный коэффициент реактивной мощности, Q_{2H} – номинальная реактивная мощность.

После подстановки выражения (3.9) в (3.21), а затем в (3.20) и умножения числителя и знаменателя на η_H и $\cos \varphi_H$ получим

$$X_{\mu} = \frac{z_H}{\left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_H}{\eta_H} - \frac{1}{2d_1 m_{\text{ку}}} \right) \eta_H \cos \varphi_H} - X_1. \quad (3.22)$$

Пользуясь T-образной схемой замещения асинхронного двигателя, определим зависимость сопротивлений асинхронного двигателя от скольжения.

Как следует из схемы замещения, приведенные активное и реактивное сопротивления ротора асинхронного двигателя являются функциями скольжения. Это связано с тем, что при повышении скольжения выше критического проявляются эффекты вытеснения тока ротора и насыщения зубцового слоя, в результате чего уменьшается индуктивное и увеличивается активное сопротивление ротора.

Зависимость приведенного активного сопротивления ротора из [65]

$$R'_2(s) = R'_2(0) + (R'_2(1) - R'_2(0))\sqrt{s}, \quad s_H < s \leq 1, \quad (3.23)$$

где

$$R'_2(0) = \frac{R'_2(s_H) - R'_2(1)\sqrt{s_H}}{1 - \sqrt{s_H}}.$$

В диапазоне изменения величины скольжения $0,2 \leq s \leq 1$ индуктивное сопротивление изменяется незначительно, в отличие от участка диапазона скольжений $0 \leq s \leq 0,2$.

Достаточно точно эта зависимость представлена в [65]

$$X_k(s) = X_k(1) + (X_k(s_H) - X_k(1))e^{-\frac{s-s_H}{T_1}}, \quad s_H \leq s \leq 1, \quad (3.24)$$

где $X_k(1)$ – индуктивное сопротивление двигателя в режиме короткого замыкания;
 T_1 – постоянная времени, которая определяется

$$T_1 = \frac{s_H - 0,05}{\ln \frac{x(0,05) - X_k(1)}{X_{k1} - X_k(1)}}. \quad (3.25)$$

Таким образом, индуктивное сопротивление рассеяния статора

$$X_1 = 0,42X_k, \quad (3.26)$$

ротора

$$X'_2 = 0,58X_k(s). \quad (3.27)$$

Полное комплексное сопротивление двигателя

$$Z(s) = R(s) + jX(s) = R_1 + jX_1 + \frac{(R_\mu + jX_\mu) \left(\frac{R'_2(s)}{s} + jX'_2(s) \right)}{R_\mu + \frac{R'_2(s)}{s} + j(X_\mu + X'_2(s))},$$

откуда, активное сопротивление двигателя

$$R(s) = R_1 + \frac{R'_2(s) \frac{X_\mu^2}{s}}{(X_\mu + X'_2(s))^2 + \frac{R_2'^2(s)}{s^2}} \quad (3.28)$$

и индуктивное сопротивление

$$X(s) = X_1 + \frac{X'_2(s) X_\mu^2 + X_\mu \left(X_2'^2(s) + \frac{R_2'^2(s)}{s^2} \right)}{(X_\mu + X'_2(s))^2 + \frac{R_2'^2(s)}{s^2}}. \quad (3.29)$$

Результаты вычислений параметров четырех различных двигателей сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей

Тип двигателя, паспортные данные	4А200М4У3	АИР355М4	4А3М-160	А4-400У-4
Параметры схемы замещения	$U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$	$U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$	$U_{\text{ном}} = 6000 \text{ В}$	$U_{\text{ном}} = 6000 \text{ В}$
	$P_{2\text{н}} = 37 \text{ кВт}$	$P_{2\text{н}} = 315 \text{ кВт}$	$P_{2\text{н}} = 1600 \text{ кВт}$	$P_{2\text{н}} = 630 \text{ кВт}$
	$M_{\text{к}} = 2,5$	$M_{\text{к}} = 2$	$M_{\text{к}} = 2,5$	$M_{\text{к}} = 2,6$
	$\eta_{\text{ном}} = 91\%$	$\eta_{\text{ном}} = 94,5\%$	$\eta_{\text{ном}} = 95,7\%$	$\eta_{\text{ном}} = 95,1\%$
	$s_{\text{ном}} = 1,7\%$	$s_{\text{ном}} = 1,3\%$	$s_{\text{ном}} = 0,66\%$	$s_{\text{ном}} = 1\%$
	$\cos\varphi_{\text{н}} = 0,90$	$\cos\varphi_{\text{н}} = 0,92$	$\cos\varphi_{\text{н}} = 0,925$	$\cos\varphi_{\text{н}} = 0,88$
	[7]	[93]	[40]	[40, 94]
$X_{\text{к}}, \text{ Ом}$	0,530	0,09	3,99	9,72
$R_1, \text{ Ом}$	0,261	0,01	0,13	0,52
$R_2, \text{ Ом}$	0,059	0,02	0,39	0,93
$X_{\text{ц}}, \text{ Ом}$	13,03	2,35	102,59	166,77
$X_1, \text{ Ом}$	0,28	0,04	1,68	4,08

Для определения погрешности методики расчета параметров Т-образной схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором сравним данные полученные в результате расчетов со справочными, полученными из технической литературы и не вызывающими сомнений. Адекватность справочных данных проверена по методике оценки приведенной в [24]. Результаты сравнения приведены в таблице 3.4.

Из таблицы следует, что предложенная методика расчета параметров Т-образной схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором имеет погрешность менее 5% и требует меньших временных затрат по сравнению с известными.

Таблица 3.4 – Погрешности расчета параметров схемы замещения асинхронных двигателей

Тип двигателя, паспортные данные	4A200M4Y3 $U_{НОМ} = 380$ В $P_{2Н} = 37$ кВт $M_K = 2,5$ $\eta_{НОМ} = 91\%$ $s_{НОМ} = 1,7\%$ $\cos\varphi_H = 0,90$ $R_{1c} = 0,274$, Ом $R_{2c} = 0,057$, Ом $x_{KC} = 0,511$, Ом [7]	4A160S4 $U_{НОМ} = 380$ В $P_{2Н} = 15$ кВт $M_K = 2,3$ $\eta_{НОМ} = 88,5\%$ $s_{НОМ} = 2,3\%$ $\cos\varphi_H = 0,88$ $R_{1c} = 0,405$, Ом $R_{2c} = 0,189$, Ом $x_{KC} = 1,749$, Ом [40]	4A225M2Y3 $U_{НОМ} = 380$ В $P_{2Н} = 55$ кВт $M_K = 2,5$ $\eta_{НОМ} = 91\%$ $s_{НОМ} = 1,8\%$ $\cos\varphi_H = 0,92$ $R_{1c} = 0,057$, Ом $R_{2c} = 0,042$, Ом $x_{KC} = 0,466$, Ом [7]
Параметры схемы замещения			
X_K , Ом	0,530	1,748	0,452
δ_{XK} , %	3,75	0,064	3,011
R_2 , Ом	0,059	0,193	0,042
δ_{R2} , %	3,3	2,016	0,926
R_1 , Ом	0,261	0,422	0,059
δ_{R1} , %	4,75	4,32	3,51

3.2.2. Определение активной и реактивной мощности трехфазного асинхронного двигателя при пуске и изменении нагрузки на валу

Поскольку в электротехнических комплексах предприятий, рассматриваемых в работе, основными потребителями активной и реактивной мощности являются асинхронные двигатели большой мощности, то потребление мощности и изменение скольжения двигателя связаны между собой. При этом можно выделить процесс изменения скольжения в «большом» или разворот двигателя и процесс изменения скольжения в «малом» при малом изменении нагрузки на валу двигателя, характеризующийся малым изменением скольжения

Δs . Поскольку для математической модели ЭТК предприятия, описанной уравнениями (3.1-3.6), изменение активной и реактивной мощностей является возмущающим воздействием, то математическое описание этих мощностей необходимо для качественной настройки системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности.

В работах [54, 55] приведены зависимости активной и реактивной мощности в функции активного и реактивного сопротивлений асинхронного двигателя. При рассмотрении этих зависимостей совместно с выражениями для активного (3.28) и реактивного (3.29) сопротивлений получим

$$P(s) = \frac{U_H^2 R(s)}{R^2(s) + X^2(s)} \quad (3.30)$$

$$Q(s) = \frac{U_H^2 X(s)}{R^2(s) + X^2(s)}. \quad (3.31)$$

Уравнения (3.28-3.31) представляют собой математическую модель, описывающую изменение активной и реактивной мощности асинхронного двигателя при изменении его скольжения.

$$\left. \begin{aligned} R(s) &= R_1 + \frac{R_2'(s) \frac{X_\mu^2}{s}}{\left(X_\mu + X_2'(s)\right)^2 + \frac{R_2'^2(s)}{s^2}} \\ X(s) &= X_1 + \frac{X_2'(s) X_\mu^2 + X_\mu \left(X_2'^2(s) + \frac{R_2'^2(s)}{s^2}\right)}{\left(X_\mu + X_2'(s)\right)^2 + \frac{R_2'^2(s)}{s^2}} \\ P(s) &= \frac{U_H^2 R(s)}{R^2(s) + X^2(s)} \\ Q(s) &= \frac{U_H^2 X(s)}{R^2(s) + X^2(s)} \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

Используя данную модель, можно получить кривые изменения активной и реактивной мощности при пуске двигателя, когда скольжение изменяется от 1 до

номинального при допущении, что напряжение сети является неизменным. На рис. (3.11) приведены данные зависимости для двигателя АИР355М4 при $U_n = 380$ В, а на рис. (3.12) для двигателя А4-400У-4 при $U_n = 6000$ В.

Из анализа графиков на рис. 3.11, 3.12 видно, что при вариации скольжения от s_n до 1 основное изменение активной и реактивной мощностей приходится на диапазон скольжения $0 \leq s \leq 0,4$.

Малое изменение скольжения, носящее ступенчатый характер $\Delta s = 0,001$ не оказывает влияния на динамику изменения активной и реактивной мощностей. При малом ступенчатом изменении скольжения двигателя изменение активной и реактивной мощностей также является ступенчатым и безынерционным.

В данном параграфе получена модель, позволяющая определить временные зависимости активной и реактивной мощности при пуске асинхронного двигателя и ступенчатом увеличении нагрузки на его валу.

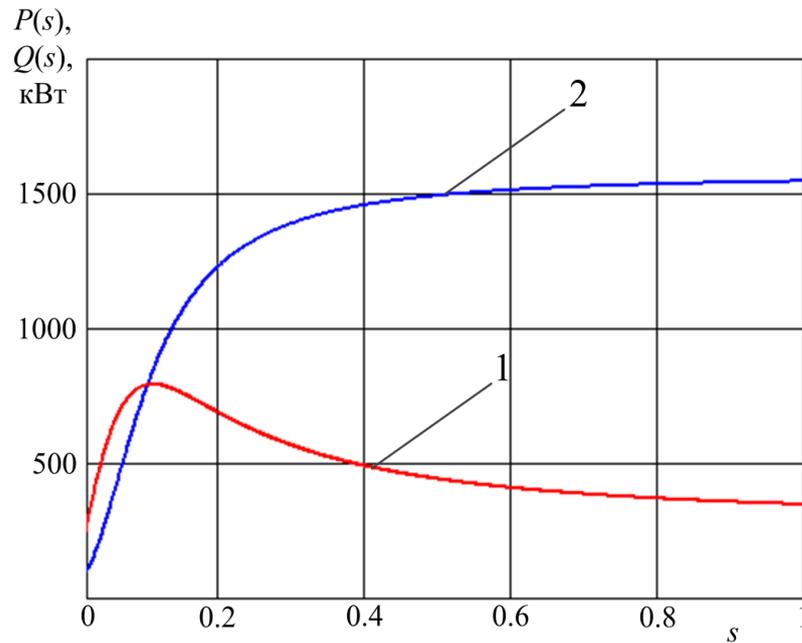


Рисунок 3.11 - Графики мощностей асинхронного двигателя АИР355М4 при изменении скольжения s от 0 до 1: 1 – активная мощность $P(s)$, 2 – реактивная мощность $Q(s)$

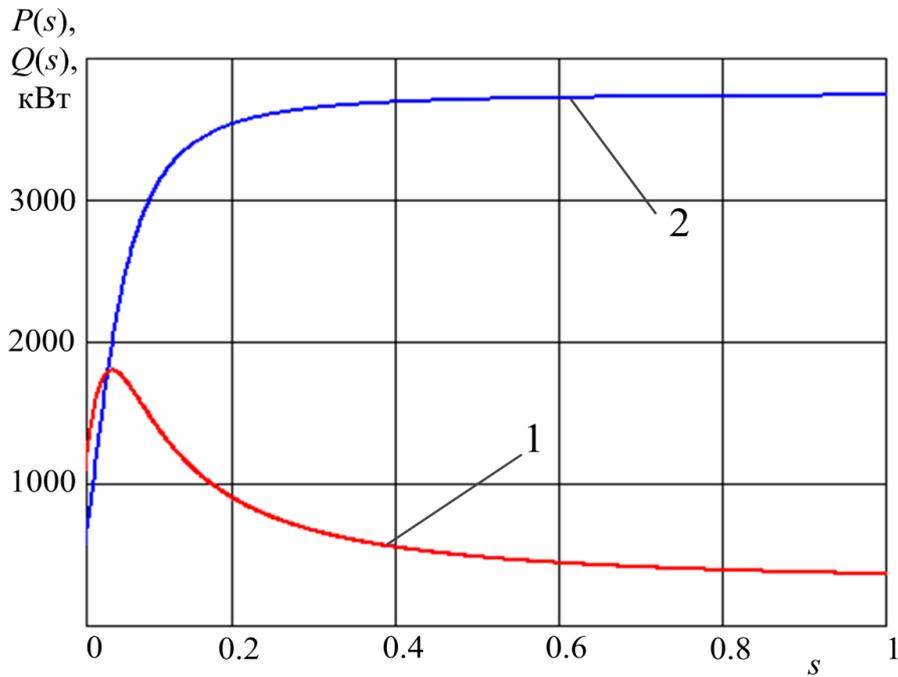


Рисунок 3.12 - Графики мощностей асинхронного двигателя А4-400У-4 при изменении скольжения s от 0 до 1: 1 – активная мощность $P(s)$, 2 – реактивная мощность $Q(s)$

3.2.3. Обобщенная математическая модель ЭТК предприятия с синхронным электроприводом с учетом возмущающего воздействия асинхронного двигателя

С целью корректного моделирования возмущающего воздействия на величину коэффициента реактивной мощности обобщенной ЭТК с синхронным электроприводом, выражающегося в виде изменения активной и реактивной мощностей, потребляемых асинхронными двигателями, к математической модели обобщенной ЭТК в виде систем уравнений (3.1-3.6) необходимо добавить уравнения (3.32). В этом случае изменение активной и реактивной мощностей на стороне низшего напряжения Т1.2 обобщенной ЭТК будут равны изменению активной и реактивной мощностей асинхронного двигателя. Так как активная и реактивная мощности асинхронного двигателя являются функциями скольжения, возмущающим воздействием на коэффициент реактивной мощности ЭТК является изменение скольжения асинхронного двигателя.

Структурная схема обобщенного ЭТК, построенная на основе схемы синхронного двигателя (3.1) и САУ $tg\varphi$ (3.5), (3.6) с учетом возмущающего воздействия со стороны асинхронного двигателя, показана на рис. 3.13.

С целью более наглядного представления структурная схема ЭТК показана в упрощенном виде на рис. 3.14.

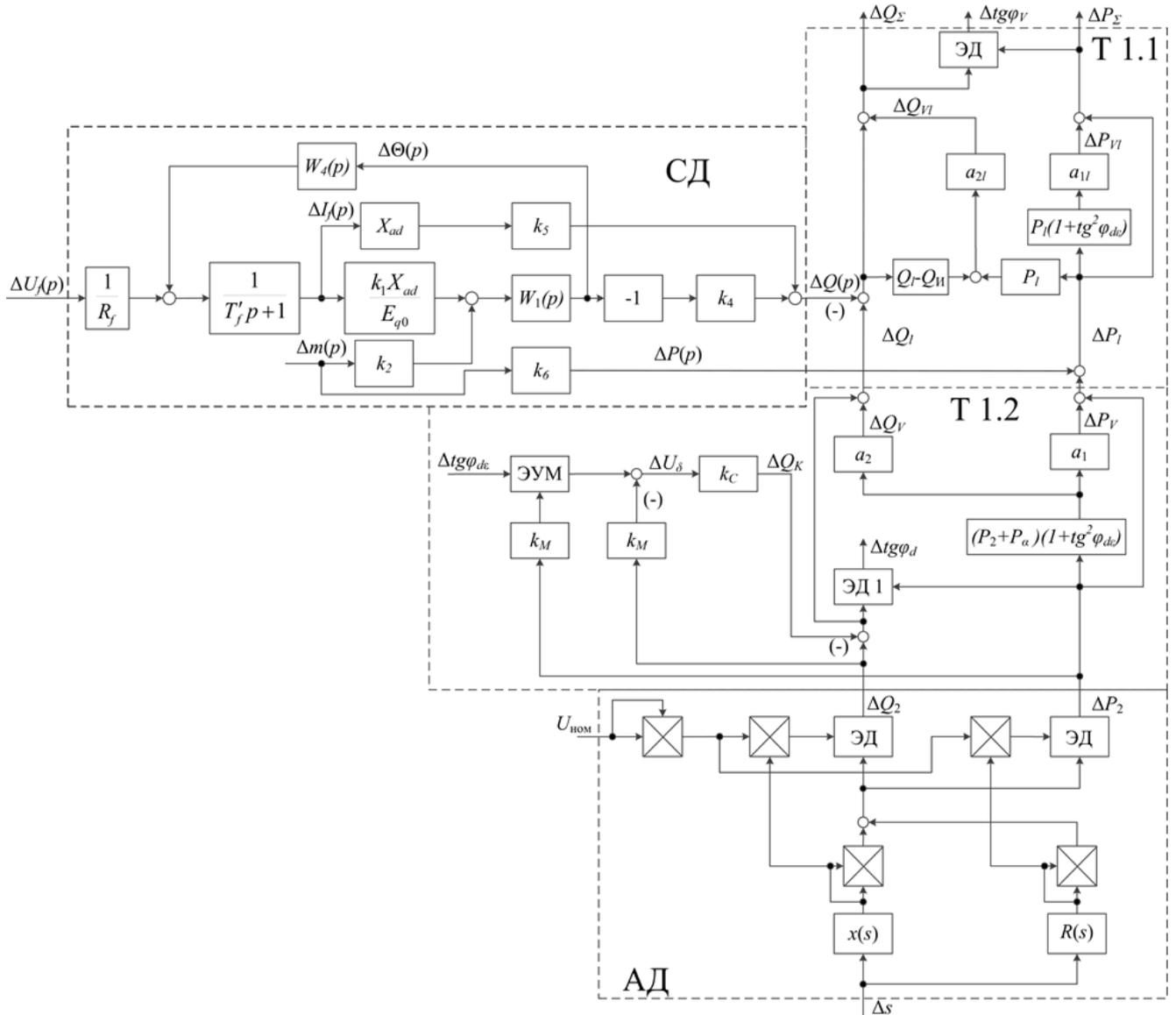


Рисунок 3.13 – Структурная схема ЭТК предприятия с синхронным электроприводом

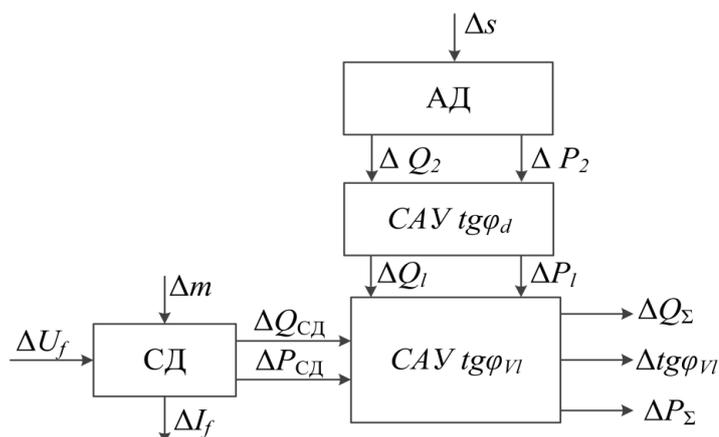


Рисунок 3.14 – Упрощенная структурная схема ЭТК предприятия с синхронным электроприводом

У обобщенного ЭТК, как объекта управления величиной коэффициента реактивной мощности (рис. 3.13, 3.14), входной координатой является приращение напряжения возбуждения СД. Возмущающими воздействиями - приращения момента на валу синхронного двигателя и скольжения асинхронного двигателя. Выходные координаты – приращения реактивной мощности ЭТК, активной мощности ЭТК и величины коэффициента реактивной мощности на стороне ВН.

Структурная схема ЭТК показанная на рисунках 3.13 и 3.14 из-за аналогичности решаемых задач похожа на структурную схему объекта управления, используемую в работах [38, 84]. Сходство заключается в наличии одинаковой входной переменной и возмущающего воздействия в виде приращения момента на валу синхронного двигателя. Отличием структур на рисунках 3.13 и 3.14 от структур [38, 84] является то, что структурная схема ЭТК учитывает параметры силовых трансформаторов КТП и потери в них (2.8), а также динамические возмущающие воздействия в виде изменения скольжения мощных асинхронных двигателей, следовательно, изменения потребляемой ими активной и реактивной мощностей. На структурной схеме объекта управления [38, 84] возмущающими воздействиями являются приращения напряжения, активной и реактивной мощностей, которые являются статическими, также не учитываются потери в элементах электрической схемы.

На рисунках 3.15 – 3.17 приведены переходные характеристики ЭТК как объекта управления коэффициентом реактивной мощности по управляющему и возмущающим воздействиям, в виде приращений напряжения возбуждения СД, момента нагрузки на валу СД и скольжения АД соответственно.

Характеристика (рис. 3.15) получена при ступенчатом изменении управляющего воздействия $\Delta U_f(t) = 0,1$ В и при постоянном значении потребляемой активной мощности $\Delta P_2(t) = 25$ кВт, характеристика (рис. 3.16) при ступенчатом набросе нагрузки на синхронный двигатель $\Delta m = 200$ Н·м., характеристики (рис. 3.17) при ступенчатом набросе нагрузки на асинхронный двигатель $\Delta s = 0,1\%$.

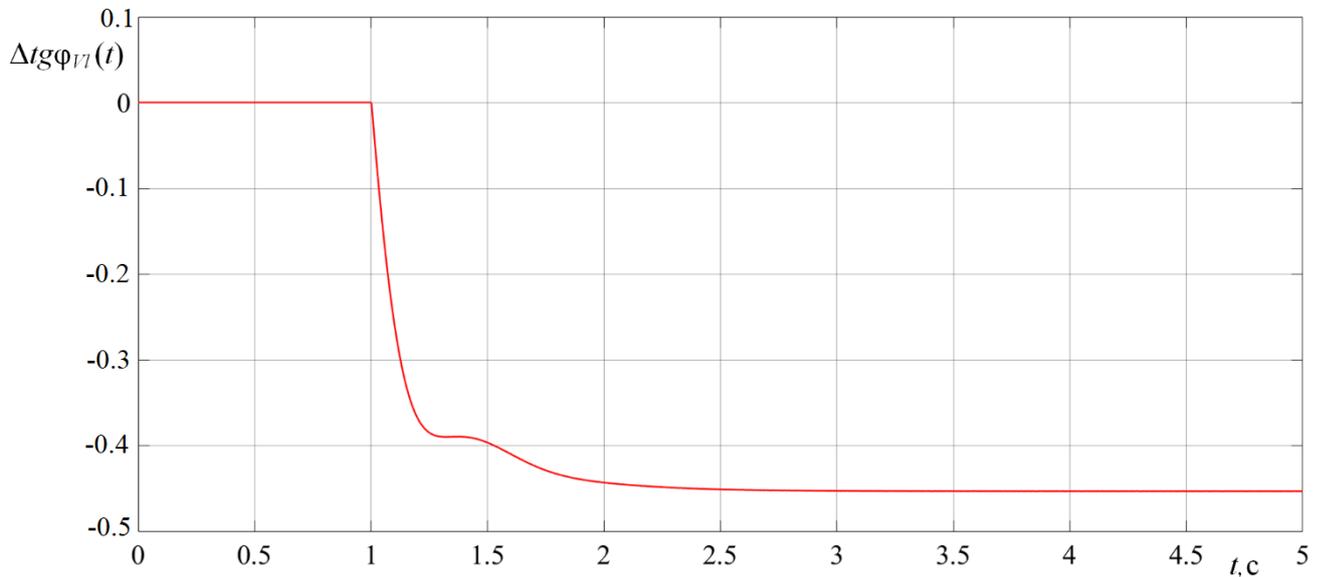


Рисунок 3.15 - Переходный процесс КРМ ЭТК на стороне ВН при изменении управляющего воздействия $\Delta U_f(t) = 0,1$ В и $\Delta P_2(t) = 25$ кВт

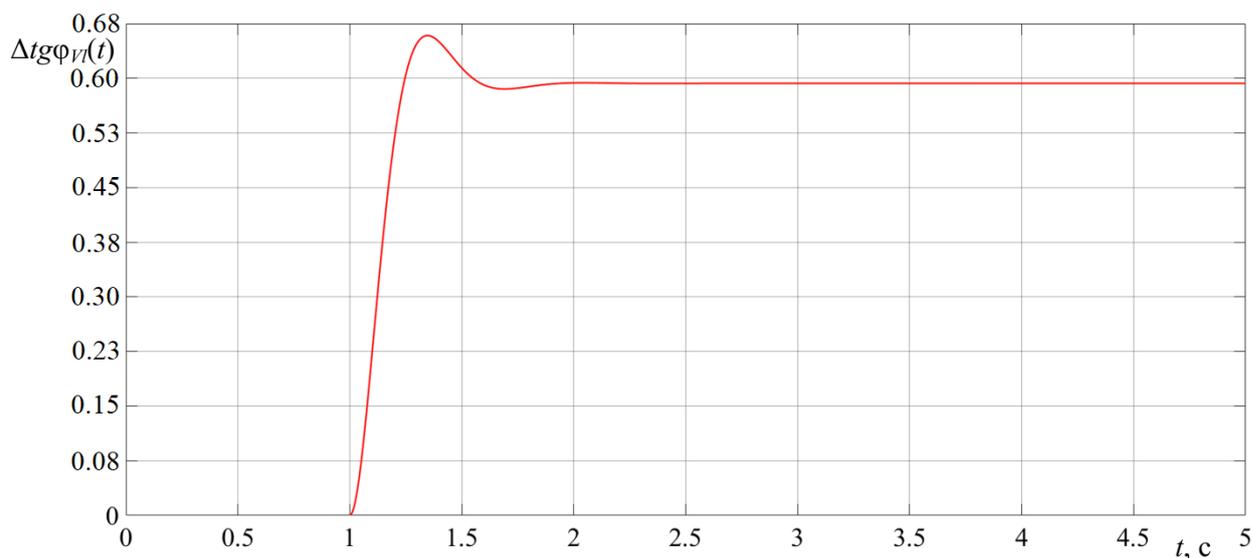


Рисунок 3.16 - График переходного процесса КРМ ЭТК на стороне ВН при изменении возмущающего воздействия $\Delta m(t) = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $\Delta P_2(t) = 25 \text{ кВт}$

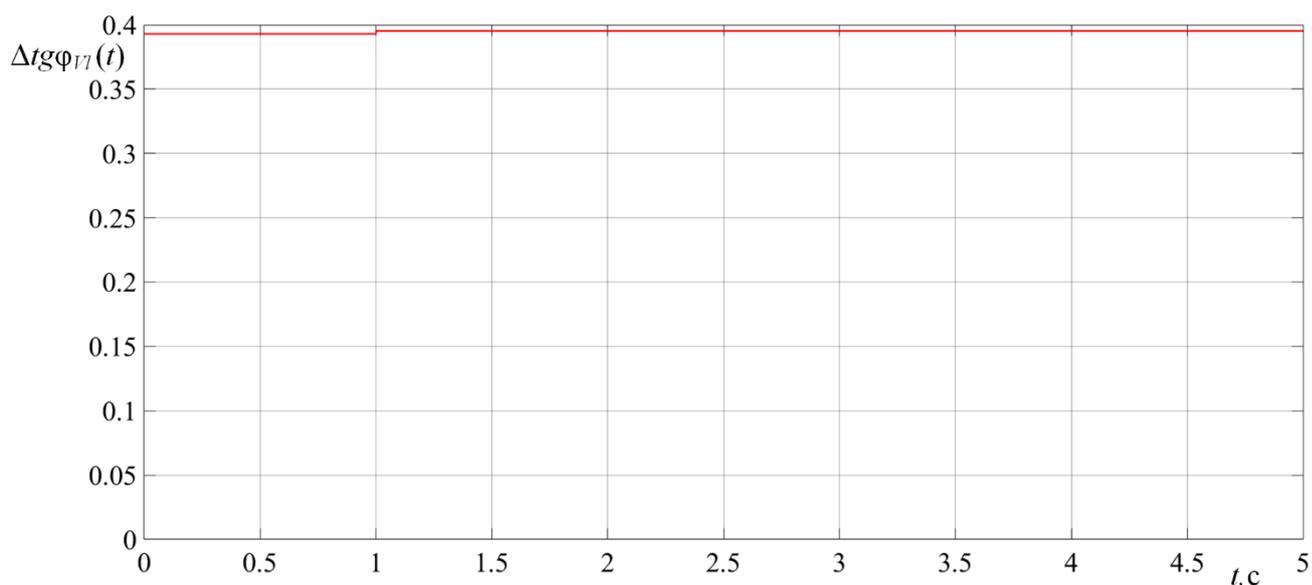


Рисунок 3.17 - График переходного процесса КРМ ЭТК на стороне ВН при изменении возмущающего воздействия $\Delta s(t) = 0,1\%$.

Из анализа этих характеристик следует, что при изменении управляющего воздействия динамика изменения величины КРМ (рис. 3.15) не отличается от переходного процесса, полученного на более простой модели (рис. 3.10). Изменение величины КРМ при набросе нагрузки на СД происходит примерно за 1 с. (рис. 3.16), а при набросе нагрузки на АД является ступенчатым. При этом существенное изменение величины КРМ на графиках (рис. 3.15 и 3.16) связано с

малым значением потребляемой активной мощности при проведении вычислительного эксперимента.

3.3. Системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности ЭТК предприятия и их динамические характеристики

Системы управления коэффициентом реактивной мощности за счет регулирования напряжения возбуждения синхронного двигателя, как правило, синтезированы на постоянство одной или нескольких переменных: тока возбуждения, угла нагрузки машины, реактивной мощности, коэффициента РМ [13, 32, 37, 38]. При этом системы управления КРМ имеют один или несколько контуров подчиненного регулирования параметров.

3.3.1. Одноконтурная система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности

Структурная схема одноконтурной системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности [8, 14, 18, 22] представлена на рис. 3.18.

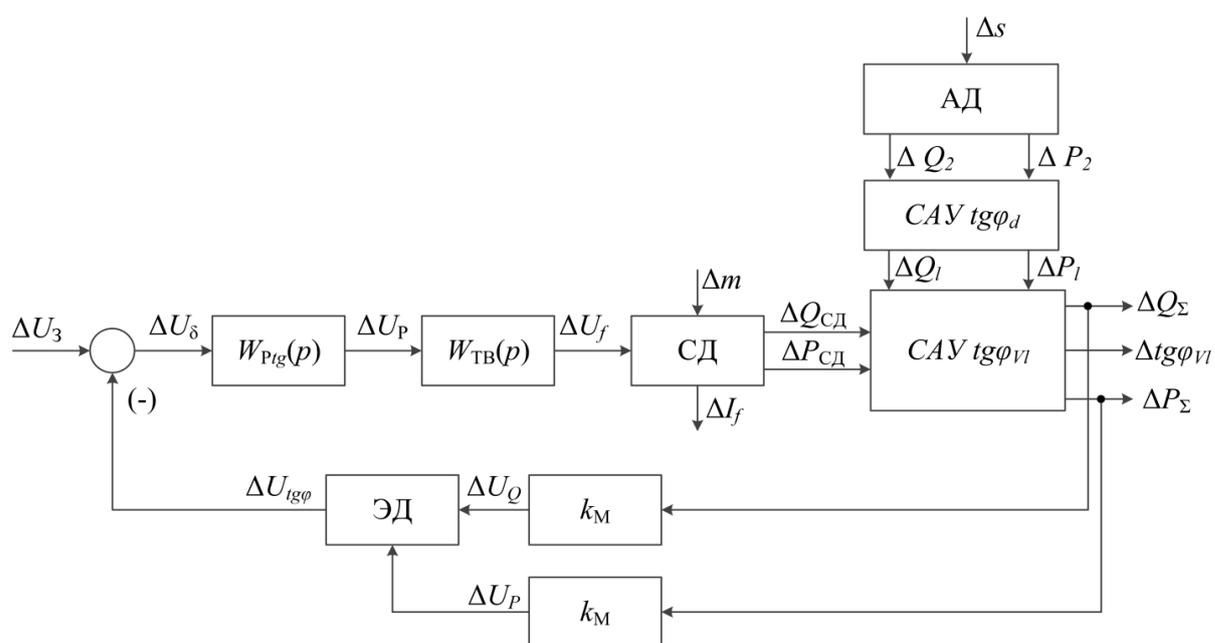


Рисунок 3.18 - Структурная схема одноконтурной САУ КРМ ЭТК

В состав схемы входят следующие элементы: синхронный двигатель, система электроснабжения, асинхронный двигатель и тиристорный возбудитель с передаточной функцией

$$W_{ТВ}(p) = \frac{k_{ТВ}}{T_{\mu}p + 1}.$$

На рисунке 3.18 обозначено: регулятор коэффициента реактивной мощности – $W_{Pig}(p)$, датчики мощности – k_M , элемент деления – ЭД, $k_{ТВ}$ – коэффициент передачи тиристорного возбудителя, T_{μ} – постоянная времени тиристорного возбудителя.

В качестве регулятора коэффициента реактивной мощности используется ПИД-регулятор с передаточной функцией [132]

$$W_{Pig}(p) = k_P + \frac{k_I}{p} + k_D p = \frac{k_D p^2 + k_P p + k_I}{p}, \quad (3.33)$$

где k_P – пропорциональный коэффициент, k_I – интегральный коэффициент и k_D – дифференциальный коэффициент.

В современных ПИД-регуляторах используются три настроечных параметра k_P – коэффициент пропорциональности, T_I – постоянная интегрирования и T_D – постоянная дифференцирования, причем последние два параметра имеют размерность времени (измеряются в секундах) [57]. В отличие от технических средств, программный комплекс MATLAB Simulink использует коэффициенты регулятора k_P , k_I и k_D , которые связаны с настроечными параметрами регулятора выражениями [132]

$$k_I = \frac{k_P}{T_I};$$

$$k_D = k_P \cdot T_D.$$

В дальнейшем, в работе использованы значения коэффициентов регулятора применительно к тем, что использует MATLAB Simulink. При настройке технически реализуемых регуляторов необходимо перевести полученные в работе коэффициенты в постоянные времени интегрирования и дифференцирования с

использованием выражений приведенных выше и округлением полученных результатов до разряда, используемого в конкретном ПИД-регуляторе.

При воздействии возмущений (изменение нагрузки на синхронном и асинхронном двигателе) в системе электроснабжения и синхронном двигателе возникают переходные процессы, в результате которых увеличивается коэффициент реактивной мощности системы электроснабжения, наблюдается перегрузка по мощности синхронного двигателя, что неблагоприятно сказывается на устойчивости системы электроснабжения. Поэтому, с целью уменьшения негативного воздействия этих процессов на ЭТК, их влияние необходимо минимизировать, а синтез регуляторов производить по критерию максимального быстродействия

$$t_{\text{ПД}} = t_{\text{min}} \quad (3.34)$$

при минимальном перерегулировании и допустимых ограничениях на величину запаса устойчивости по фазе:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_{\text{min}} \quad (3.35)$$

$$\Delta\varphi = |\Delta\varphi_{\text{max}}| \quad (3.36)$$

Настройка регулятора с учетом приведенных (3.35-3.36) показателей качества переходного процесса производится с помощью программного пакета MATLAB Simulink и метода Зиглера-Никольса [81, 87, 96, 132].

Метод Зиглера-Никольса для настройки регуляторов выбран исходя из своей простоты и применения его в промышленности в качестве одно из самых распространенных методов используемых для автоматической настройки ПИД-регуляторов. Следовательно, использование данного метода позволяет получить коэффициенты ПИД-регуляторов и оценить показатели качества переходных процессов в САУ КРМ ЭТК при использовании автоматической настройки ПИД-регулятора.

При настройке методом Зиглера-Никольса значение коэффициента пропорциональности, при котором в системе устанавливаются автоколебания с периодом $t_U = 1$ сек составляет $k_U = 0,143$. Далее, используя формулы

$$k_p = 0.6k_U; k_i = 1.2 \frac{k_U}{t_U}; k_D = 75 \cdot 10^{-3} k_U t_U, \quad (3.37)$$

рассчитываем коэффициенты регулятора.

Значения коэффициентов, полученные в результате расчетов, приведены в таблице 3.5

Таблица 3.5 – Коэффициенты ПИД-регулятора для одноконтурной САУ КРМ ЭТК

Метод определения коэффициентов	k_p	k_I	k_D
MATLAB Simulink	0,003	0,064	$9,23 \cdot 10^{-5}$
Зиглера-Никольса	0,008	0,077	$11,22 \cdot 10^{-5}$

Одноконтурная система управления коэффициентом реактивной мощности реализована в MATLAB Simulink.

Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура, состоящего из ПИД-регулятора, тиристорного возбудителя, синхронного двигателя и датчиков мощности с выходной координатой в виде напряжения датчика обратной связи по величине коэффициента реактивной мощности представлены на рис. 3.19.

Анализируя частотные характеристики (рис. 3.19) можно сделать вывод, что при настройке регулятора величины коэффициента реактивной мощности методом Зиглера-Никольса и программными средствами MATLAB Simulink в области низких частот логарифмические характеристики совпадают и обладают одинаковым запасом устойчивости в 900. Следовательно, в этой области невозможно определить преимущество в настройке тем или иным методом. Для определения наиболее оптимального метода настройки необходимо сравнить характеристики переходного процесса по управляющему и возмущающим воздействиям.

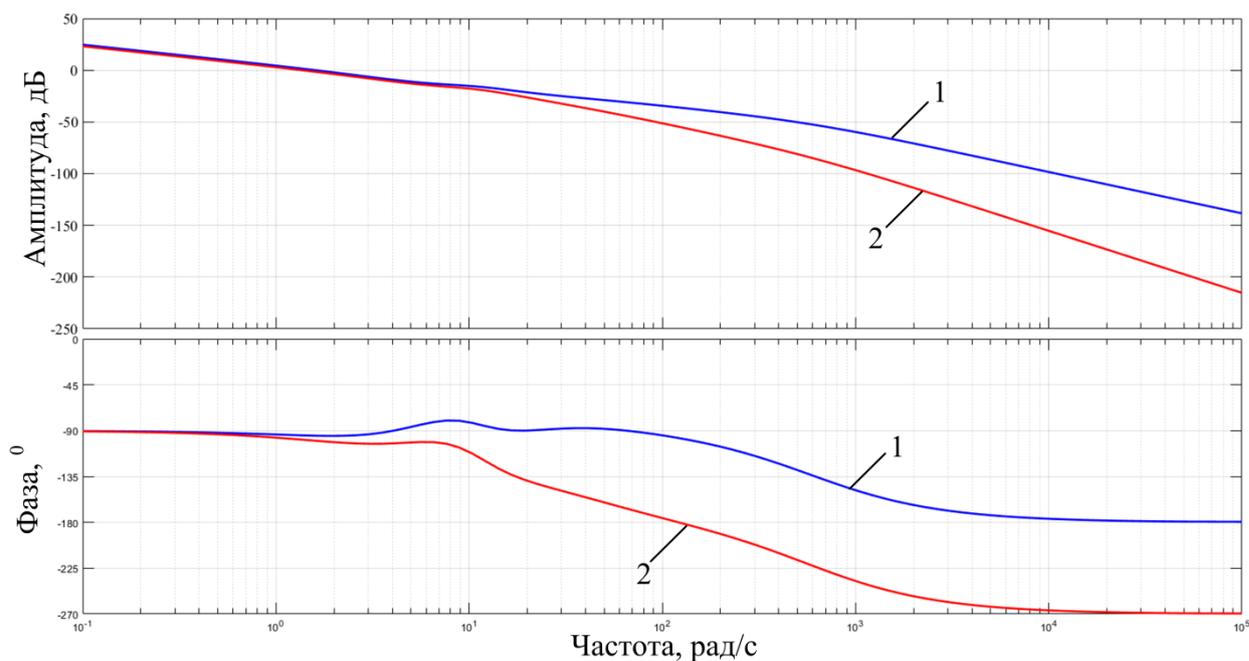


Рисунок 3.19 - Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики разомкнутого контура управления коэффициентом реактивной мощности:

1- при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса; 2 – при настройке регулятора с помощью MATLAB Simulink

Графики переходного процесса по управляющему воздействию $\Delta U_3 = 0,1$ В для коэффициента реактивной мощности на стороне ВН при настройке ПИД-регулятора двумя методами представлены на рис. 3.20

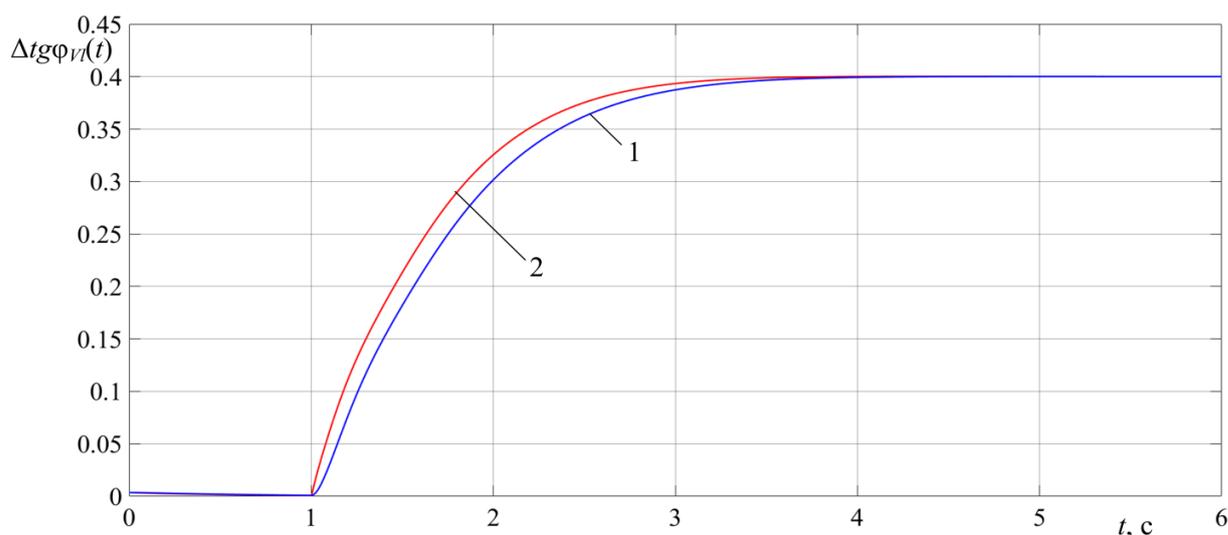


Рисунок 3.20 - Графики переходного процесса КРМ на стороне ВН по управляющему воздействию $\Delta U_3 = 0,1$ В: 1- при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса; 2 – при настройке регулятора с помощью MATLAB Simulink

Графики переходного процесса по возмущающему воздействию $\Delta m = 200$ Н·м. для КРМ на стороне ВН при настройке ПИД-регулятора двумя методами показаны на рис. 3.21.

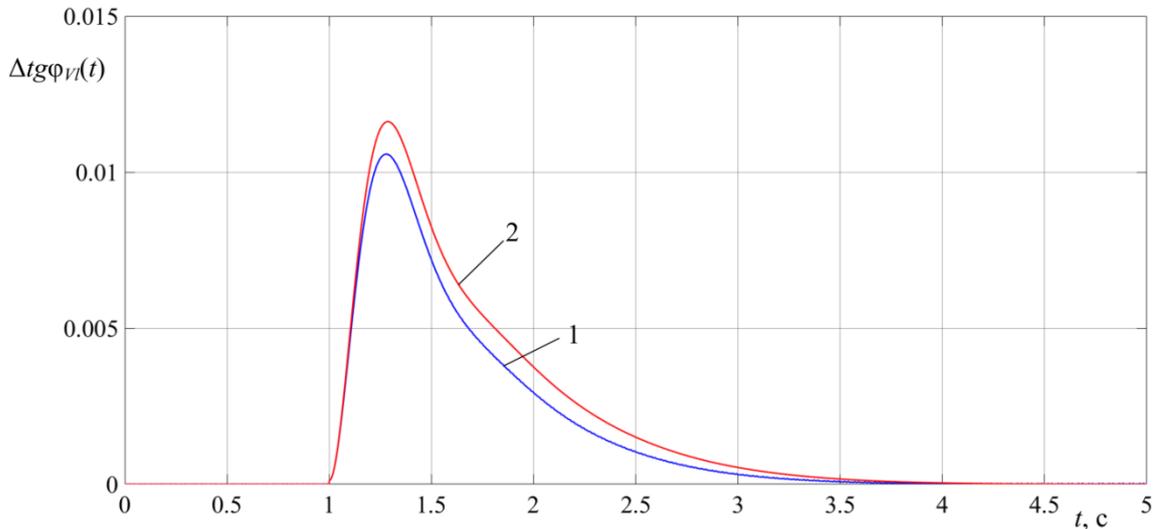


Рисунок 3.21 - Графики переходного процесса КРМ на стороне ВН по возмущающему воздействию $\Delta m = 200$ Н·м: 1- при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса; 2 – при настройке регулятора с помощью MATLAB Simulink

Графики переходного процесса по возмущающему воздействию $\Delta s = 0,1$ % для КРМ на стороне ВН при настройке ПИД-регулятора двумя методами представлены на рис. 3.22.

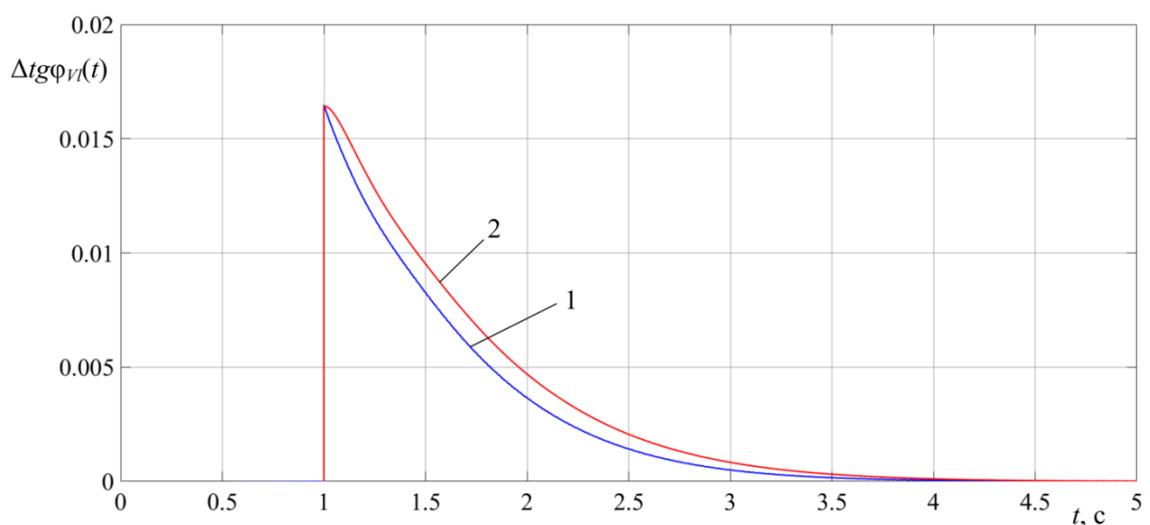


Рисунок 3.22 - Графики переходного процесса КРМ на стороне ВН по возмущающему воздействию $\Delta s = 0,1\%$: 1- при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса; 2 – при настройке регулятора с помощью MATLAB Simulink

Из анализа графиков на рис. 3.20 – 3.22 можно определить, что время переходного процесса по управляющему воздействию $t_{ппу1} = t_{ппу2} = 1,8$ с, а перерегулирование $\sigma_{у1} = \sigma_{у2} = 0\%$. При набросе нагрузки на СД время переходного процесса $t_{ппм1} = t_{ппм2} = 3$ с, а перерегулирование $\sigma_{M1} = 2,75\%$, $\sigma_{M2} = 3\%$. При набросе нагрузки на АД $t_{ппс1} = t_{ппс2} = 2$ с, а перерегулирование $\sigma_{S1} = \sigma_{S2} = 4\%$. Время переходного процесса, равное 1 с., находилось относительно времени приложения управляющего (рис. 3.20) и возмущающего (рис. 3.21, 3.22) воздействий. Перерегулирование определено относительно установившегося значения КРМ $tg\varphi = 0,4$.

Анализ переходных процессов показал, что оба метода настройки регулятора величины коэффициента реактивной мощности не дают существенных преимуществ системе при обработке управляющего воздействия. Настройка регулятора величины коэффициента реактивной мощности по методу Зиглера-Никольса позволяет добиться лучших показателей качества переходного процесса по возмущающему воздействию Δt в отличие от настройки программными средствами MATLAB Simulink. Таким образом, можно сделать вывод, что настройка регулятора величины коэффициента реактивной мощности методом Зиглера-Никольса является более предпочтительной.

3.3.2. Синхронный электропривод с обратной связью по току возбуждения

С целью уменьшения влияния переходных процессов по управляющему и возмущающим воздействиям на динамику изменения тока возбуждения синхронного двигателя и исключения его резких бросков, превышающих допустимые значения, желательно при синтезе систем автоматического управления синхронными двигателями предусматривать контур регулирования тока возбуждения (КРТВ).

Структурная схема синхронного электропривода с обратной связью по току возбуждения ΔI_f [4, 38, 85] приведена на рис. 3.23.

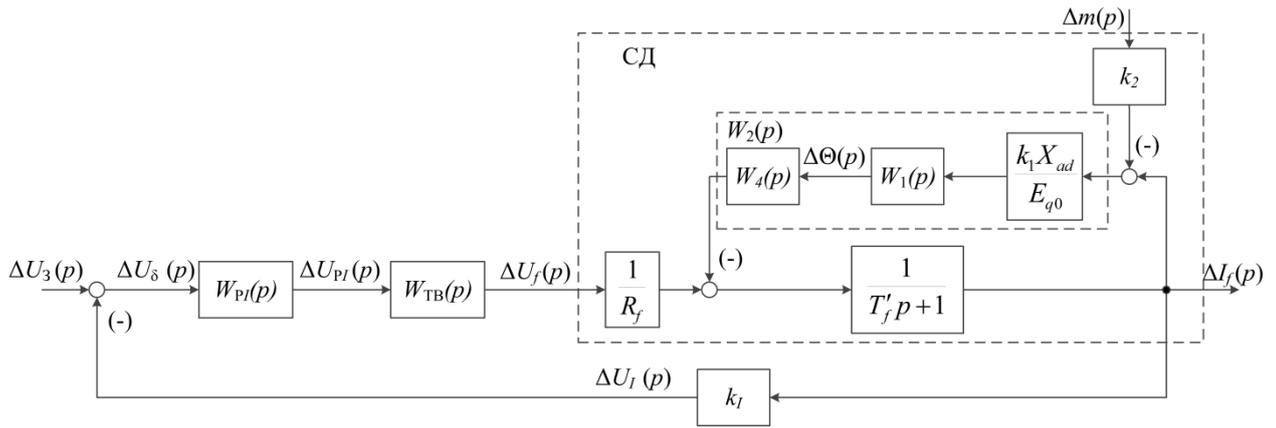


Рисунок 3.23 - Структурная схема контура управления током возбуждения синхронного двигателя

С целью упрощения синтеза регулятора полагаем, что возмущающее воздействие $\Delta m(p) = 0$. С точки зрения настройки регулятора по управляющему воздействию такое допущение является обоснованным, но требует исследования реакции КРТВ на возмущающее воздействие.

Обозначим

$$W_2(p) = \frac{k_1 X_{ad}}{E_{q0}} W_1(p) W_4(p) = \frac{k_0 T_{d1} p}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1},$$

где k_0 постоянный коэффициент

$$k_0 = \frac{k_1 X_{ad}}{E_{q0}}.$$

Теперь можно определить передаточную функцию двигателя по управляющему воздействию

$$W_{сд}(p) = \frac{1}{1 + \frac{W_2(p)}{T'_f p + 1}} = \frac{T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1}{(T'_f p + 1)(T_3 p^2 + 2\xi_3 T_3 p + 1)}$$

где

$$T_3 = \sqrt{T_1^2 + T'_f k_0 T_{d1}}, \quad \xi_3 = \frac{2T_1 \xi_1 + k_0 T_{d1}}{2\sqrt{T_1^2 + T'_f k_0 T_{d1}}}$$

Для двигателя СТД-630-23УХЛ4, используемого в ЭТК НСМ, значения параметров передаточной функции T_3 и ξ_3 для различных моментов инерции приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Механическая постоянная времени и декремент затухания передаточной функции СД по управляющему воздействию

Момент инерции J , кг·м ²	21,3	124,8	281,5	390
T_3 , с	0,086	0,219	0,329	0,389
ξ_3	0,582	0,237	0,147	0,128

Передаточная функция синхронного электропривода как объекта управления током возбуждения будет иметь вид

$$W_{OVI}(p) = R_f^{-1} W_{CD}(p) W_{TB}(p) = \frac{R_f^{-1} k_{TB} (T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)}{(T_\mu p + 1)(T_f' p + 1)(T_3 p^2 + 2\xi_3 T_3 p + 1)} \quad (3.38)$$

Таким образом, структурную схему контура управления током возбуждения синхронного двигателя (рис.3.24) можно представить в виде односвязных блоков

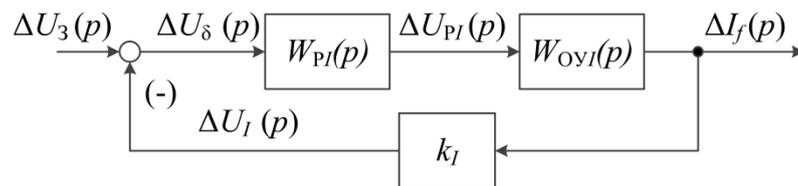


Рисунок 3.24 - Структурная схема контура управления током возбуждения синхронного двигателя с ПИД-регулятором

$W_{PI}(p)$ – передаточная функция ПИД-регулятора тока, $W_{OVI}(p)$ – передаточная функция синхронного электропривода как объекта управления током возбуждения, k_I – коэффициент передачи датчика тока возбуждения, $\Delta U_3(p)$ – напряжение задания тока возбуждения, $\Delta U_\delta(p)$ – напряжение на выходе элемента сравнения, $\Delta U_{PI}(p)$ – напряжение на выходе регулятора тока, $\Delta I_f(p)$ – ток возбуждения синхронного двигателя, $\Delta U_I(p)$ – напряжение датчика тока.

Когда у объекта управления можно четко определить передаточную функцию, и она является линейной, помимо экспериментальных и программных методов настройки ПИД-регуляторов можно использовать аналитические методы [118]. Современные аналитические методы настройки [132] предполагают временную (интегральную) оценку качества системы. Наилучшей считается оценка по интегралу от взвешенного модуля сигнала ошибки (ИВМО) [132].

Для настройки регулятора по условию ИВМО получим передаточную функцию замкнутого КРТВ.

$$W_{KPTB}(p) = \frac{W_{PI}(p)W_{OVI}(p)}{1 + W_{PI}(p)W_{OVI}(p)k_I} =$$

$$= \frac{k_{TB}(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)(k_D p^2 + k_P p + k_I)}{R_f p (T_f' p + 1)(T_\mu p + 1)b(T_3^2 p^2 + 2\xi_3 T_3 p + 1)}$$

где b

$$b = \frac{k_{TB}k_{OCI}(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)(k_D p^2 + k_P p + k_I)}{R_f p (T_f' p + 1)(T_\mu p + 1)(T_3^2 p^2 + 2\xi_3 T_3 p + 1)} + 1$$

Поскольку передаточная функция замкнутого контура регулирования тока возбуждения сложна для определения параметров ПИД-регулятора, то с целью её упрощения предлагается ее аппроксимировать передаточную функцию синхронного электропривода как объекта управления током возбуждения (3.38) выражением

$$W_{AI}(p) = \frac{R_f^{-1}k_{TB}}{(T_\mu p + 1)(T_f' p + 1)}. \quad (3.39)$$

Для сравнения на рис. 3.25 представлены логарифмические частотные характеристики, построенные по полной и аппроксимированной передаточным функциям контура управления током возбуждения двигателя СТД-630-23УХЛ4.

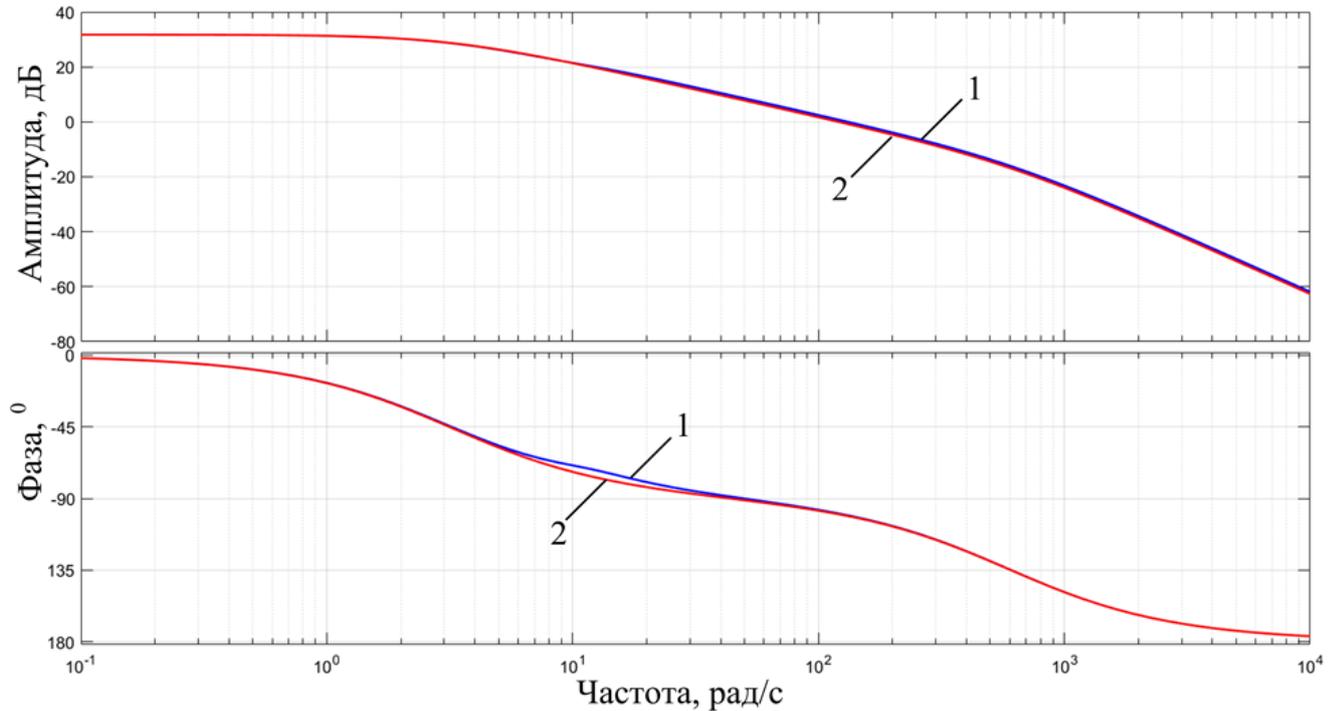


Рисунок 3.25 - Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики КРТВ: 1- полученные по полной передаточной функции; 2 – полученные по аппроксимированной передаточной функции

Анализ частотных характеристик, полученных по выражениям (3.38) и (3.39) показывает, что во всем диапазоне частот передаточная функция синхронного электропривода (3.38) может быть аппроксимирована функцией вида (3.39) с погрешностью менее 1 дБ.

Передаточная функция замкнутого КРТВ принимает вид

$$W_{\text{КРТВ}}(p) = \frac{k_{\text{ТВ}}(k_D p^2 + k_P p + k_I)}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \quad (3.40)$$

где коэффициенты характеристического полинома $a_3 = R_f T_f' T_\mu$;

$$a_2 = R_f T_f' + R_f T_\mu + k_D k_{\text{ТВ}} k_{\text{ОС}}; \quad a_1 = R_f + k_P k_{\text{ТВ}} k_{\text{ОС}}; \quad a_0 = k_I k_{\text{ТВ}} k_{\text{ОС}}$$

Оптимальная по критерию ИВМО передаточная функция контура регулирования тока возбуждения имеет вид

$$W_{\text{КРТВ}}^{\text{ИВМО}}(p) = \frac{\omega_{\text{ПН}}^3}{p^3 + 1,75\omega_{\text{ПН}} p^2 + 2,15\omega_{\text{ПН}}^3 p + \omega_{\text{ПН}}^3} \quad (3.41)$$

Значение параметра $\omega_{\text{ПН}}$ приближенно определяется выражением [132]

$$\omega_{\text{III}} = \frac{4}{t_{\text{III}} \xi},$$

где t_{III} – время переходного процесса, ξ – декремент затуханий.

Задавшись временем переходного процесса $t_{\text{III}} = 4\text{с}$ и условием отсутствия колебаний в КРТВ $\xi = 1$ получим, что $\omega_{\text{III}} = 1$, а оптимальная по критерию ИВМО передаточная функция системы имеет вид

$$W_{\text{КРТВ}}^{\text{ИВМО}}(p) = \frac{1}{p^3 + 1,75p^2 + 2,15p + 1}$$

Значение декремента затуханий $\xi = 1$ необходимо для обеспечения условия отсутствия колебаний тока возбуждения и реактивной мощности при работе системы управления. Время переходного процесса в 4 с. соответствует условию максимального быстродействия при отсутствии перерегулирования, колебаний тока возбуждения при отработке управляющего и возмущающего воздействий, а также допустимого запаса устойчивости по фазе.

Таким образом, зная значения коэффициентов знаменателя передаточных функций (3.40) и (3.41) определяем коэффициенты регулятора k_P , k_I и k_D из системы алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} 1,75 &= R_f T_f' + R_f T_\mu + k_D k_{\text{ТВ}} k_{\text{OC}} \\ 2,15 &= R_f + k_P k_{\text{ТВ}} k_{\text{OC}} \\ 1 &= k_I k_{\text{ТВ}} k_{\text{OC}} \end{aligned} \right\}$$

При известных значениях $R_f = 0,075$ Ом, $T_f' = 0,314$ с., $T_\mu = 0,0017$ с., $k_{\text{ТВ}} = 2,9$, $k_{\text{OC}} = 0,041$, получаем значения $k_I = 8,4$, $k_P = 17,45$, $k_D = 14,52$.

Для приведения выражений (3.40) и (3.41) к общему знаменателю необходимо в структуру КРТВ включить фильтр

$$W_\Phi(p) = \frac{W_{\text{КРТВ}}^{\text{ИВМО}}(p)}{W_{\text{КРТВ}}(p)} = \frac{k_{\text{ТВ}}^{-1} k_I^{-1}}{(T_{\Phi 1} p + 1)(T_{\Phi 2} p + 1)}, \quad (3.42)$$

где $T_{\Phi 1}$ и $T_{\Phi 2}$ – постоянные времени фильтра, определяемые из передаточной функции (3.42) и равные 0,1 с. и 0,3 с. соответственно.

Для сравнения эффективности настройки ПИД-регулятора по критерию ИВМО эти же коэффициенты определены методом Зиглера – Никольса и программным комплексом MATLAB Simulink. Расчеты сведены в таблицу 3.7

Таблица 3.7 – Коэффициенты ПИД-регулятора для КРТВ

Метод определения коэффициентов	k_p	k_I	k_D
ИВМО	17,45	8,40	14,52
MATLAB Simulink	0,20	0,63	0
Зиглера-Никольса	0	0,66	0

Модель контура регулирования тока возбуждения синхронного двигателя, настроенного по критерию ИВМО, реализована в MATLAB Simulink.

Графики переходных процессов по управляющему воздействию $\Delta U_3 = 0,1\text{В}$ и возмущающему воздействию $\Delta m = 200\text{ Н}\cdot\text{м}$ с ПИД-регулятором настроенным по методам ИВМО, Зиглера-Никольса и программными средствами MATLAB Simulink приведены на рис. 3.26 и 3.27.

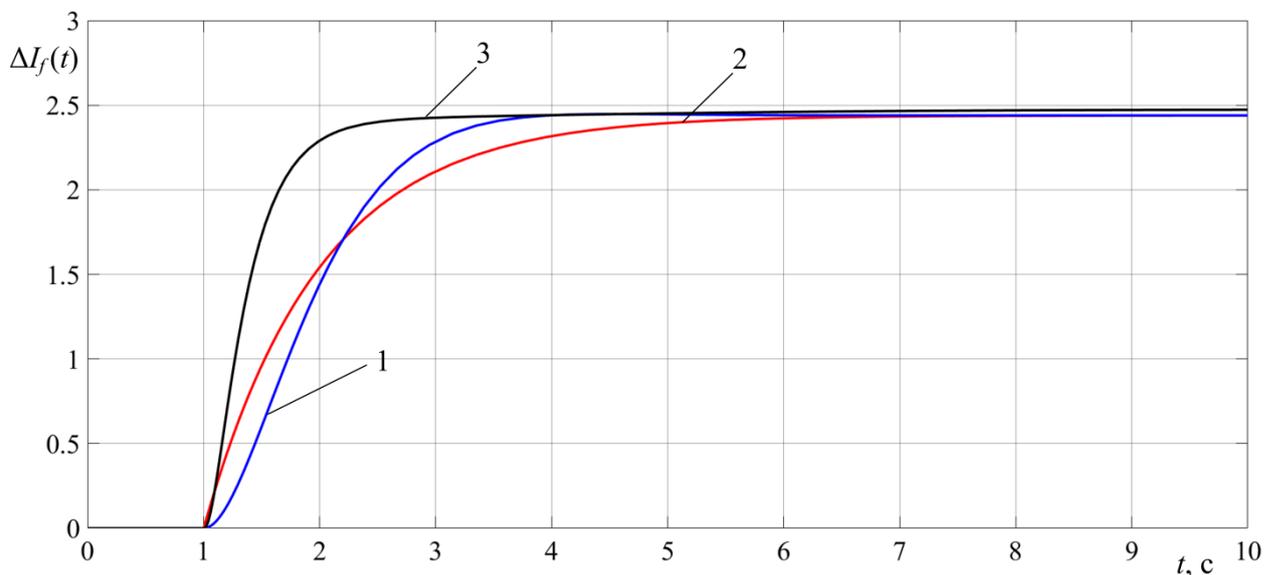


Рисунок 3.26 - Графики переходного процесса тока возбуждения СД по управляющему воздействию $\Delta U_3 = 0,1\text{ В}$: 1- при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса; 2 – при настройке регулятора с помощью MATLAB Simulink; 3 – при настройке по критерию ИВМО

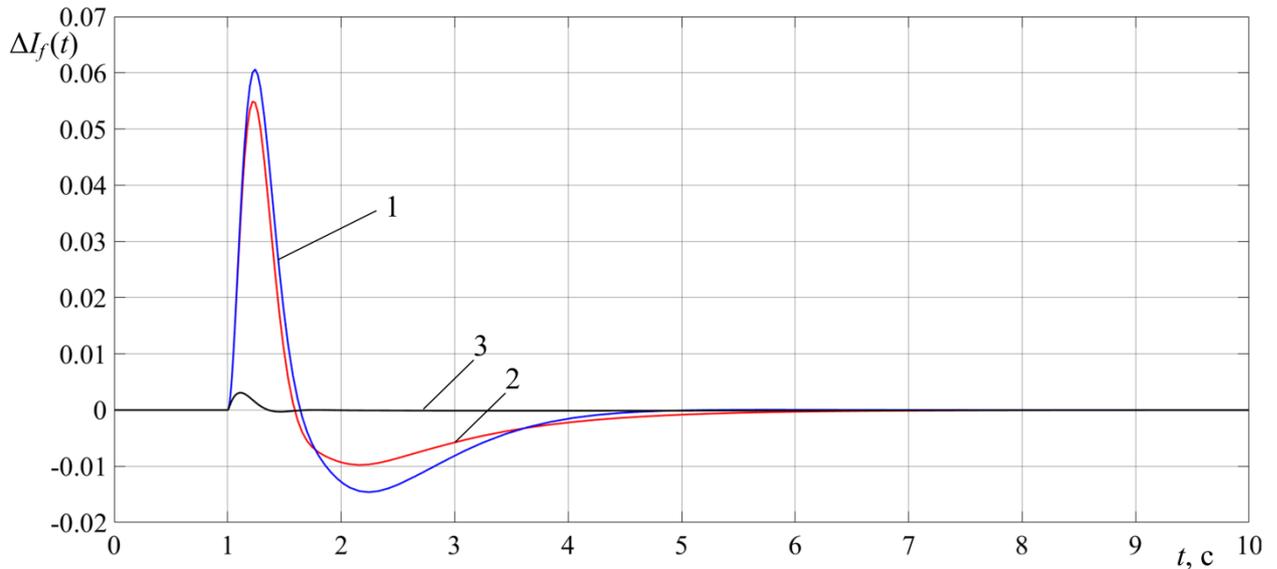


Рисунок 3.27 - Графики переходного процесса тока возбуждения СД по возмущающему воздействию $\Delta m = 200$ Н·м: 1- при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса; 2 – при настройке регулятора с помощью MATLAB Simulink; 3 – при настройке по критерию ИВМО

Из анализа кривых переходного процесса по управляющему воздействию следует, что время переходного процесса при настройке методом Зиглера – Никольса составляет 2,11 с., программными средствами MATLAB Simulink 2,85 с., по критерию ИВМО 1 с., перерегулирование во всех случаях минимально. Статическая ошибка составляет 0,52% при настройке методом Зиглера – Никольса, 0,87% программными средствами MATLAB Simulink и 0,45% по критерию ИВМО. Следовательно, при работе КРТВ при изменении управляющего воздействия настройка ПИД-регулятора по критерию ИВМО является более предпочтительной.

Анализ графиков переходного процесса по возмущающему воздействию на рис. 3.27 показывает, что время переходного процесса при настройке методом Зиглера – Никольса составляет 3 с., программными средствами MATLAB Simulink 3 с., по критерию ИВМО 0,5 с. Перерегулирование при настройке методом Зиглера – Никольса составляет 6,1%, программными средствами MATLAB Simulink 5,5%, по критерию ИВМО 0,3% с. Статическая ошибка минимальна.

Таким образом, по совокупности показателей качества переходного процесса, таких как время переходного процесса, и перерегулирование видно, что аналитический способ настройки ПИД-регулятора контура регулирования тока возбуждения синхронного двигателя по критерию интеграла от взвешенного модуля сигнала ошибки является наиболее предпочтительным.

Отличительной особенностью КРТВ (рис. 3.23) от схожих систем [76] является то, что использование КРТВ не предполагается в качестве самостоятельной системы регулирования величины КРМ, а только в качестве подчиненного контура, ориентированного на стабилизацию тока возбуждения синхронного двигателя. Причем, основной задачей при синтезе регуляторов является получение монотонного процесса с минимальным перерегулированием при обработке управляющего и возмущающего воздействий.

3.3.3. Двухконтурная система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности

Структурная схема двухконтурной системы управления коэффициентом реактивной мощности представлена на рис. 3.28. Двухконтурная система управления коэффициентом реактивной мощности, реализована в MATLAB Simulink.

В структуру двухконтурной системы автоматического управления включены подчиненный контур регулирования тока возбуждения, настроенный по критерию ИВМО и внешний контур регулирования коэффициента реактивной мощности.

Для внешнего контура регулирования коэффициента реактивной мощности коэффициенты ПИД-регулятора определялись по методу Зиглера – Никольса и программным пакетом MATLAB Simulink. Их значения приведены в таблице 3.8. Настройка по критерию ИВМО применительно к ЭТК предприятия крайне трудоемка в виду сложной структуры системы управления коэффициентом реактивной мощности.

Таблица 3.8 – Коэффициенты ПИД-регулятора для двухконтурной САУ КРМ ЭТК

Метод определения коэффициентов	k_P	k_I	k_D
MATLAB Simulink	0.018	0.229	0.008
Зиглера-Никольса	0.042	0.224	0.006

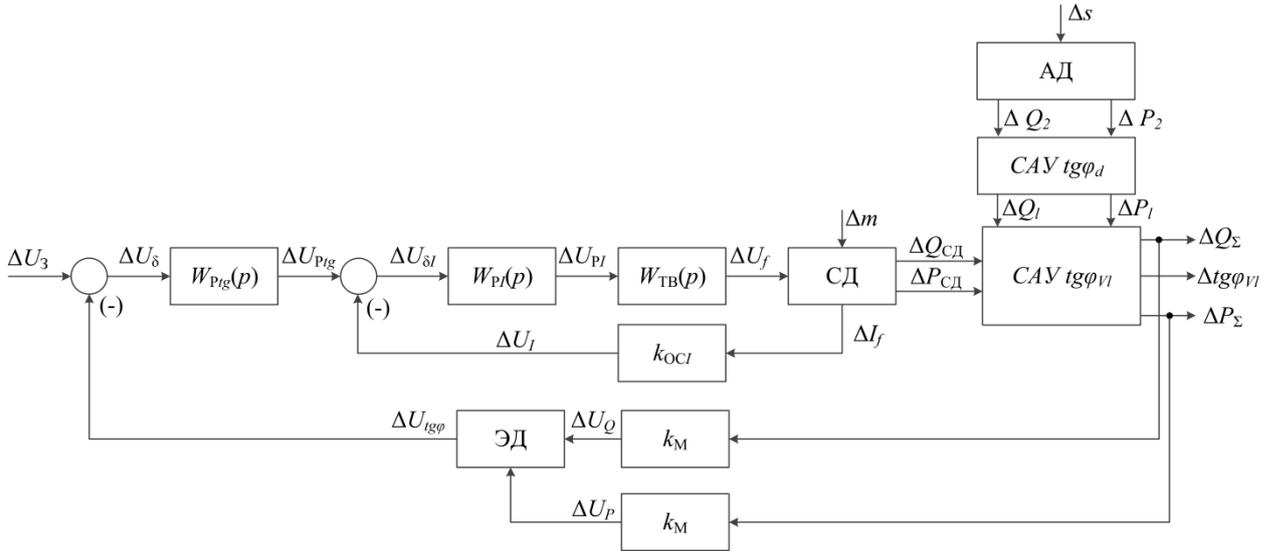


Рисунок 3.28 - Структурная схема двухконтурной САУ КРМ ЭТК

Графики переходного процесса по управляющему воздействию $\Delta U_3 = 10$ В для КРМ на стороне ВН при настройке ПИД-регулятора двумя методами представлены на рис. 3.29.

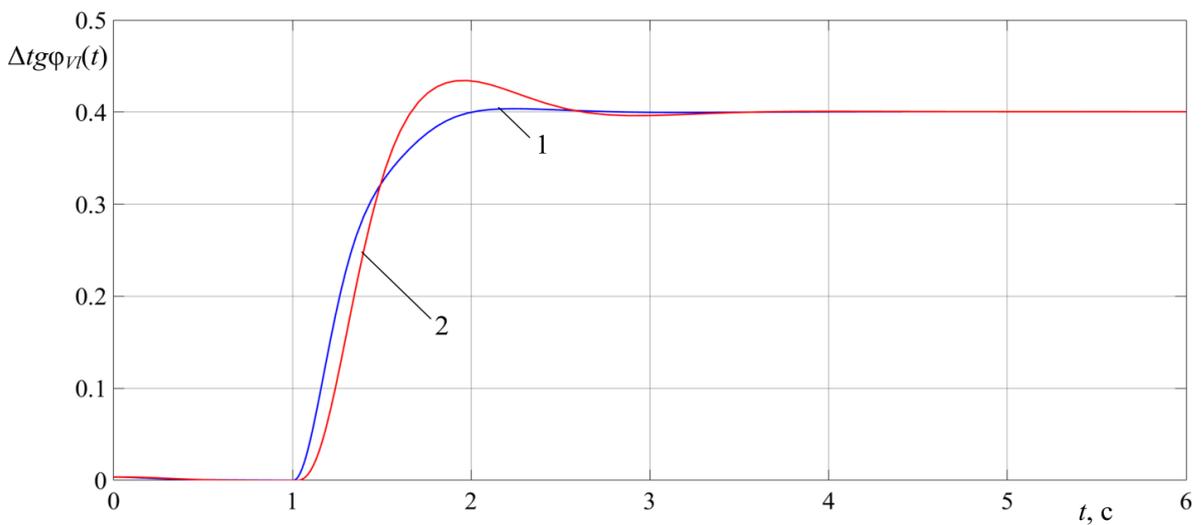


Рисунок 3.29 - Графики переходного процесса КРМ на стороне ВН по управляющему воздействию $\Delta U_3 = 10$ В: 1- при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса; 2 – при настройке регулятора с помощью MATLAB Simulink

По виду графиков переходного процесса по управляющему воздействию ΔU_3 (рис. 3.29) определено, что время переходного процесса $t_{ппу1} = 0,77$ с, $t_{ппу2} = 1,26$ с, перерегулирование при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса σ_{y1} стремится к нулю, а в случае настройки программными средствами MATLAB Simulink $\sigma_{y2} = 8,5\%$, статическая ошибка $\varepsilon_{y1} = 0,05\%$, $\varepsilon_{y2} = 0,18\%$.

Графики переходного процесса по возмущающему воздействию $\Delta m = 200$ Н·м для КРМ на стороне ВН при настройке ПИД-регулятора двумя методами представлены на рис. 3.30.

Переходные процессы по возмущающему воздействию $\Delta s = 0,1$ % для КРМ на стороне ВН при настройке ПИД-регулятора двумя методами показаны на рис. 3.31.

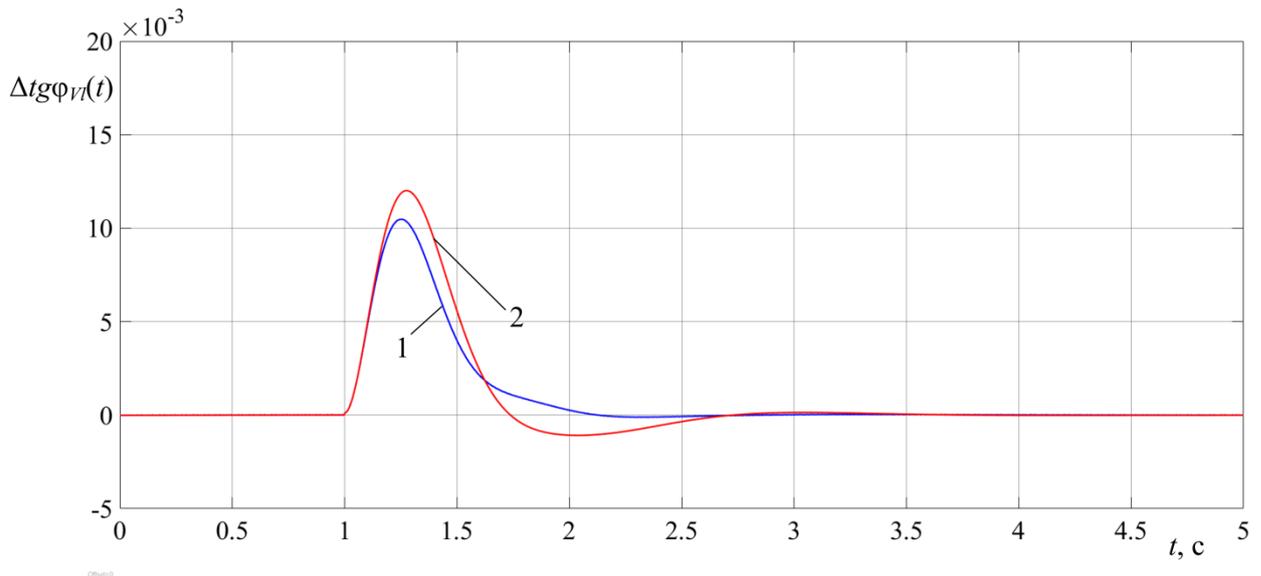


Рисунок 3.30 - Графики переходного процесса КРМ на стороне ВН по возмущающему воздействию в виде изменения момента нагрузки СД $\Delta m = 200$ Н·м: 1- при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса; 2 – при настройке регулятора с помощью MATLAB Simulink

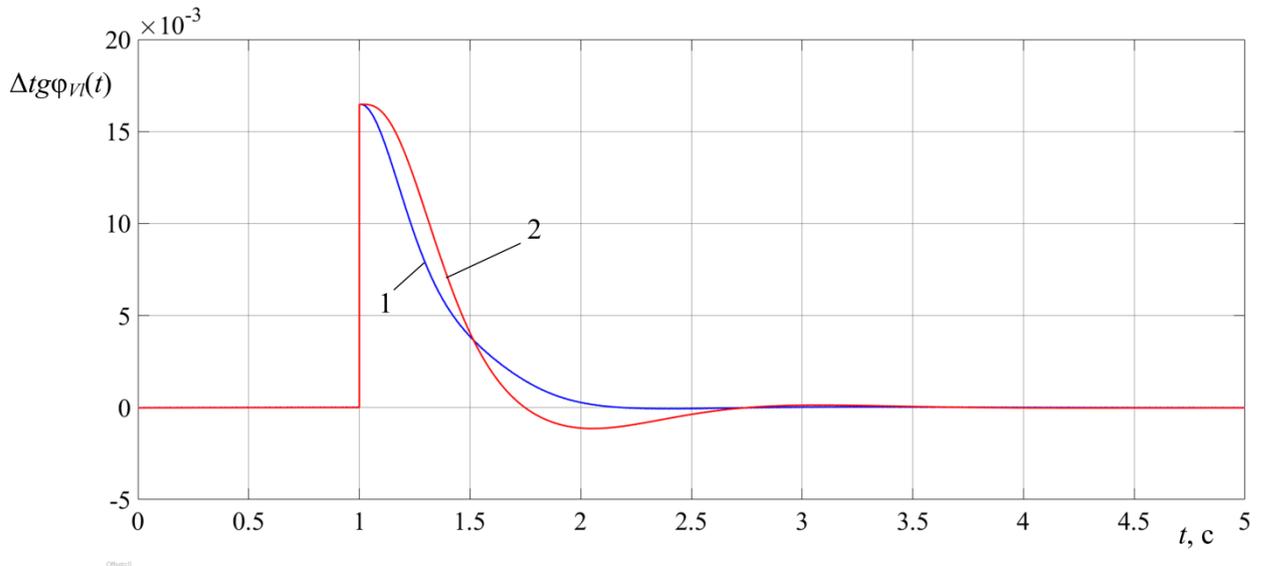


Рисунок 3.31 - Графики переходного процесса КРМ на стороне ВН по возмущающему воздействию в виде изменения скольжения АД $\Delta s = 0,1\%$: 1- при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса; 2 – при настройке регулятора с помощью MATLAB Simulink

Анализ графиков переходного процесса при набросе нагрузки на СД (рис. 3.31) показал, что время переходного процесса $t_{\text{ППМ1}} = 1$ с, $t_{\text{ППМ2}} = 1,3$ с., перерегулирование $\sigma_{M1} = 2,5\%$, а $\sigma_{M2} = 3\%$. По набросу нагрузки на АД $t_{\text{ППС1}} = 1$ с., $t_{\text{ППС2}} = 1,5$ с., а перерегулирование $\sigma_{S1} = \sigma_{S2} = 4,25\%$.

Из анализа графиков переходных процессов (рис. 3.29-3.31) при настройке контура регулирования коэффициента реактивной мощности методом Зиглера-Никольса (1) и программными средствами MATLAB Simulink (2) можно сделать вывод, что коэффициенты ПИД-регулятора полученные по методу Зиглера-Никольса позволяют добиться лучших показателей качества переходного процесса, а графики имеют монотонный характер.

Исследование влияния ввода КРТВ, настроенного по критерию ИВМО, в структуру САУ КРМ ЭТК на характер переходного процесса тока возбуждения СД позволяет оценить эффективность использования регулирования тока возбуждения. На рис. 3.32 и 3.33 показаны переходные характеристики системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности при наличии КРТВ и его отсутствии.

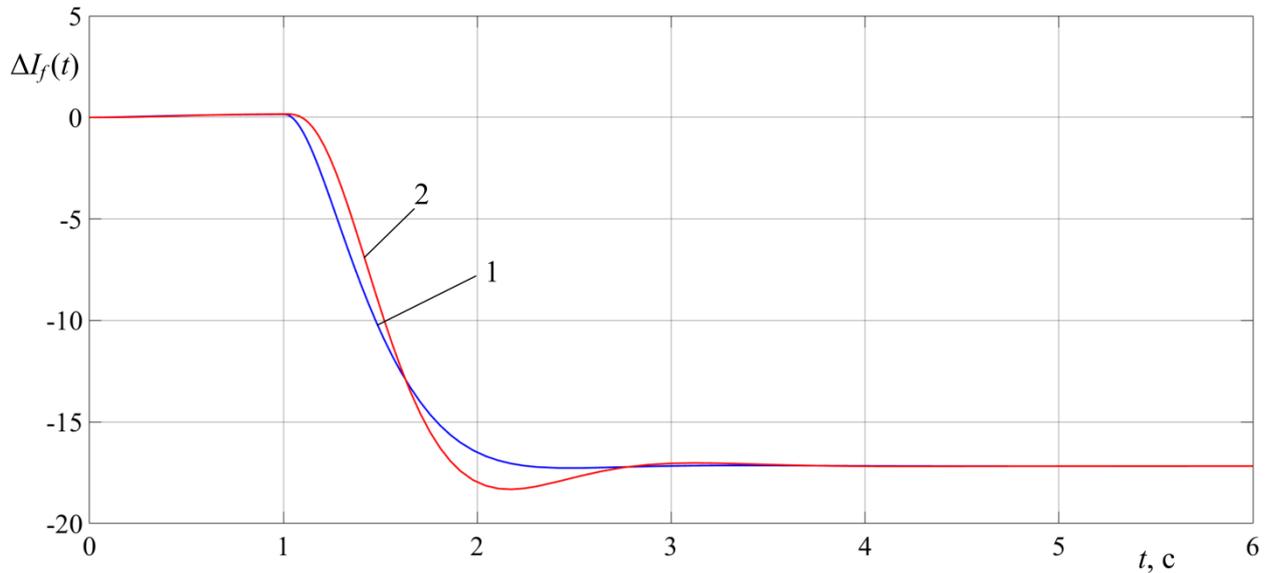


Рисунок 3.32 - Графики переходного процесса тока возбуждения СД по управляющему воздействию $\Delta U_3 = 0,1$ В: 1- при наличии контура регулирования тока возбуждения; 2 – без регулирования тока возбуждения

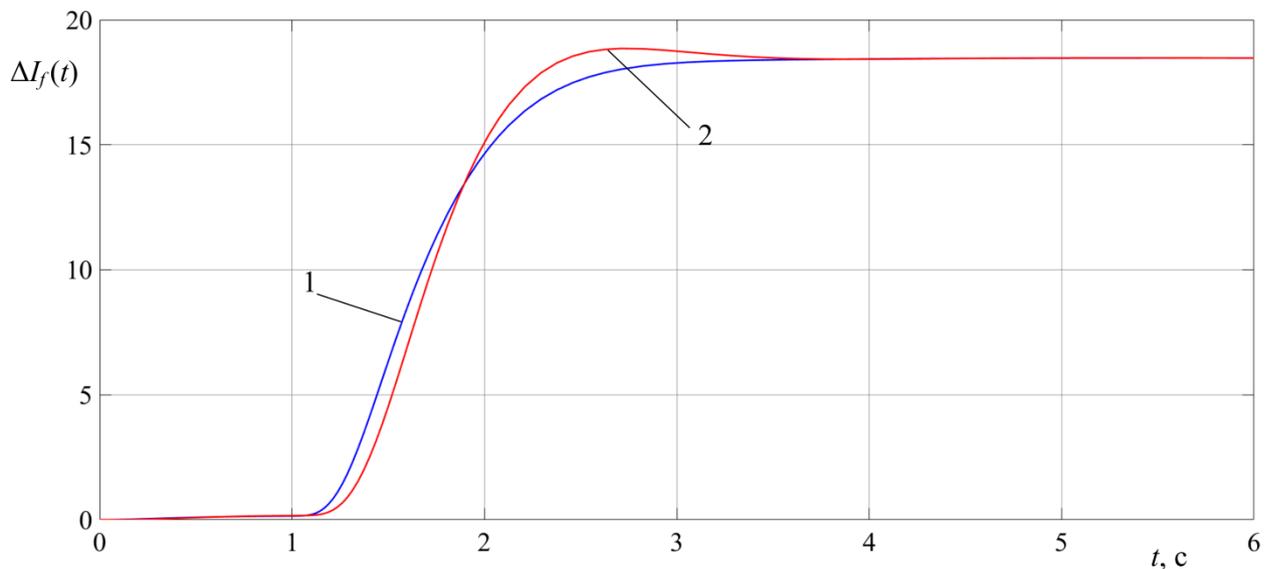


Рисунок 3.33 - Графики переходного процесса тока возбуждения СД по возмущающему воздействию $\Delta m = 200$ Н·м: 1- при наличии контура регулирования тока возбуждения; 2 – без регулирования тока возбуждения

Анализ графиков (рис. 3.32 и 3.33) переходного процесса по управляющему воздействию $\Delta U_3 = 0,1$ В показывает, что время переходного процесса $t_{\text{ППУ1}} = 1$ с, $t_{\text{ППУ2}} = 2$ с, перерегулирование в обоих случаях стремится к нулю, статическая ошибка $\varepsilon_{y1} = 0,11\%$, $\varepsilon_{y2} = 0,02\%$. Графики переходного процесса по

возмущающему воздействию Δt (рис. 3.33) время переходного процесса $t_{\text{ПММ1}} = 1,5$ с., $t_{\text{ПММ2}} = 3$ с., перерегулирование в обоих случаях стремится к нулю.

Таким образом, наличие подчиненного контура регулирования тока возбуждения синхронного двигателя в структуре системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности положительно сказывается на качестве переходного процесса.

Параметры настройки регуляторов для одноконтурной и двухконтурной структур системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности приведены в таблице 3.9.

Значения показателей качества переходного процесса: время переходного процесса $t_{\text{ППУ}}$, перерегулирование $\delta_{\text{ППУ}}$, статическая ошибка ε по управляющему воздействию, время переходного процесса $t_{\text{ПММ}}$, $t_{\text{ПМС}}$ и величина перерегулирования $\delta_{\text{ПММ}}$, $\delta_{\text{ПМС}}$ по возмущающему воздействию приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.9 – Коэффициенты ПИД-регуляторов для одно- и двухконтурной САУ КРМ ЭТК

Число контуров	Вариант настройки контура	Параметры регуляторов					
		Регулятор тока			Регулятор КРМ		
		k_P	k_I	k_D	k_P	k_I	k_D
1	MATLAB Simulink	-	-	-	0,003	0,064	$9,23 \cdot 10^{-5}$
	метод Зиглера-Никольса	-	-	-	0,008	0,077	$11,22 \cdot 10^{-5}$
2	ИВМО	17,45	8,40	14,52	-	-	-
	MATLAB Simulink	0,20	0,63	0	0.018	0.229	0.008
	метод Зиглера-Никольса	0	0,66	0	0.042	0.224	0.006

Таблица 3.10 – Показатели качества переходных процессов одно- и двухконтурной САУ КРМ ЭТК

Число контуров	Вариант настройки контура	Показатели качества переходного процесса						
		По управляющему воздействию			По возмущающему воздействию			
		$t_{ппу}$, с	$\sigma_{ппу}$, %	ϵ , %	$t_{ппм}$, с	$\sigma_{ппм}$, %	$t_{ппс}$, с	$\sigma_{ппс}$, %
1	MATLAB Simulink	1,8	0	0,02	3	3	2	4
	метод Зиглера-Никольса	1,8	0	0,01	3	2,75	2	4
2	MATLAB Simulink	1,26	8,5	0,18	1,3	3	1,5	4,25
	метод Зиглера-Никольса	0,77	0	0,05	1	2,5	1	4,25

Из таблицы 3.10 следует, что при обработке управляющего и возмущающего воздействий одноконтурная система имеет худшие показатели качества переходного процесса, чем двухконтурная. Таким образом, использование САУ КРМ ЭТК с двухконтурной структурой обеспечивает более высокое быстродействие при обработке управляющего и возмущающего воздействий за счет ввода в структуру контура регулирования тока возбуждения синхронного двигателя.

Значения статической ошибки в рассмотренных системах автоматического управления коэффициентом реактивной мощности приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Статическая ошибка САУ КРМ ЭТК

№ п.п.	Тип САУ коэффициентом РМ	Статическая ошибка по величине $\Delta tg\varphi_V$, %
1	САУ $tg\varphi_d$	4,5
2	САУ $tg\varphi_V$	0,75
3	Одноконтурная САУ КРМ ЭТК	0,01
4	Двухконтурная САУ КРМ ЭТК	0,05

Анализ данных в таблице 3.11 показывает, что в замкнутых по величине КРМ на стороне ВН системах управления статическая ошибка, как в двухконтурном, так и в одноконтурном варианте практически отсутствует. В разомкнутых системах управления с обратной связью по возмущающему воздействию САУ $tg\varphi_d$ (раздел 2.4) и САУ $tg\varphi_V$ (раздел 2.5) статическая ошибка достигает значений, при которых возможно превышение предельных значений коэффициента реактивной мощности. Это характерно для систем управления реактивной мощностью на стороне низшего напряжения трансформаторной подстанции.

Из совокупности полученных результатов следует, что использование двухконтурной структуры САУ КРМ ЭТК с подчиненным КРТВ является наиболее предпочтительным, т.к. обеспечивает наилучшие показатели качества переходного процесса.

Отличительной особенностью САУ КРМ ЭТК, представленных на рисунках 3.18 и 3.28, является то, что при своей ориентации на регулирование КРМ используют отрицательную обратную связь по величине КРМ на стороне ВН, охватывающую возмущающие воздействия со стороны потребителей и элементов ЭТК. Это отличает разработанную САУ от близких систем (рис. 1.13) [113, 125, 149, 152], где выходная координата (КРМ) не охвачена обратной связью, что приведет к значительному ухудшению точности связанное с влиянием учтенных и не учтенных возмущающих воздействий. Также методы настройки регуляторов САУ КРМ ЭТК выбраны с целью значительного уменьшения влияния возмущающих воздействий и отсутствия колебаний реактивной мощности в ЭТК.

3.4. Выводы по третьей главе

В ходе решения задач по разработке математической модели динамических процессов в ЭТК, методики расчета параметров АД и синтеза САУ получены следующие результаты:

1. На базе моделей синхронного двигателя и статических моделей трансформаторных подстанций получена математическая модель электротехнического комплекса предприятия как объекта управления коэффициентом реактивной мощности.

2. Определены параметры Т-образной схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным, на основании которых рассчитаны кривые изменения активной и реактивной мощности при пуске двигателя. Получена математическая модель асинхронного двигателя как возмущающего воздействия на коэффициент реактивной мощности системы электроснабжения.

3. Показано, что настройка САУ КРМ ЭТК методом Зиглера-Никольса дает лучшие показатели качества переходного процесса при регулировании параметров сложных объектов управления, нежели настройка программными средствами MATLAB Simulink. Доказано, что двухконтурная САУ КРМ ЭТК быстрее обрабатывает возмущающее воздействие и является более предпочтительной по сравнению с одноконтурной за счет наличия подчиненного контура регулирования тока возбуждения синхронного двигателя.

4. Установлено, что системы автоматического управления, замкнутые по величине коэффициента реактивной мощности на стороне высшего напряжения питающих трансформаторов, имеют погрешность 0,01% и 0,05% для одноконтурной и двухконтурной систем соответственно, что значительно меньше, чем в разомкнутых системах с обратной связью по возмущающему воздействию.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭТК НСМ

4.1. Техническая реализация САУ КРМ ЭТК НСМ

Для реализации системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения применяются устройства входящие в состав подстанции в качестве датчиков выходных координат. Дополнительно используется управляющее устройство. На рис.4.1 показан вариант технической реализации САУ КРМ.

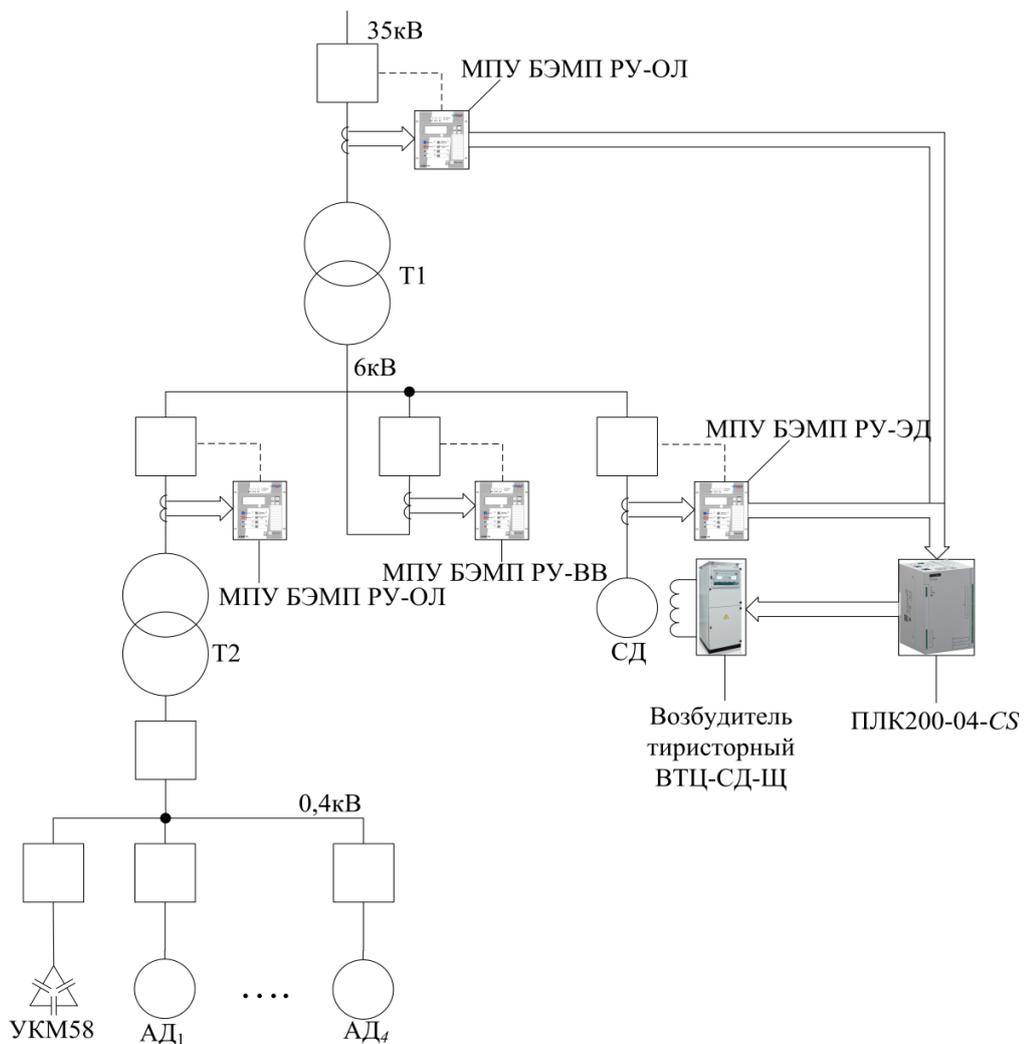


Рисунок 4.1 – Вариант технической реализации САУ КРМ

Для контроля активной и реактивной мощностей, потребляемых ЭТК НСМ, применяется микропроцессорный блок релейной защиты и автоматики (МПУ) БЭМП РУ-ВВ-5-220-ЕТ-УХЛ3.1[28], потребляемых синхронным двигателем МПУ БЭМП РУ-ЭД-5-220-ЕТ-УХЛ3.1 [29], потребляемых трансформаторами Т1 и Т2 МПУ БЭМП РУ-ОЛ-5-220-ЕТ-УХЛ3.1 [30], установленные в ячейках отходящей линии к трансформатору. Их характеристики приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Технические характеристики МПУ

Тип МПУ	БЭМП РУ- ВВ	БЭМП РУ- ЭД	БЭМП РУ- ОЛ
Основная относительная погрешность измерения тока, не более, %	±1,5		
Основная относительная погрешность измерения напряжения, не более, %	±1,5		

КРТВ выполнен на тиристорном возбудителе ВТЦ-СД-Щ-320-48-УХЛ3 [74], входящим в состав распределительного устройства низкого напряжения (РУНН). Его технические характеристики приведены в таблице 4.2

Таблица 4.2 – Технические характеристики тиристорного возбудителя

Наименование параметра	Значение
Номинальное напряжение, В	48
Схема выпрямления	3-х фазная с нулевым выводом
Номинальный ток возбуждения, А	320
Кратность форсировки по току	2,0

Контур регулирования коэффициента реактивной мощности выполнен на программируемом логическом контроллере ПЛК200-04-CS производства ОВЕН [57] и применяется дополнительно в качестве управляющего устройства, установленного в релейном отсеке РУНН. Его технические данные приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Технические характеристики программируемого логического контроллера

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	24
Порты связи и поддерживаемые протоколы	2xEthernet 10/100 Мбит/с <i>Modbus</i> <i>TCP</i>
Количество дискретных входов, шт	8
Количество универсальных аналоговых входов, шт	4
Количество дискретных выходов типа реле, шт	8

Система компенсации реактивной мощности на стороне низшего напряжения трансформатора Т2 выполнена на основе регулируемой конденсаторной установки УКМ58П-0,4-100-10 У3 [88] с блоком управления *ERN* 11007 [63]. Их технические характеристики приведены в таблицах 4.4 и 4.5 соответственно.

Таблица 4.4 – Технические характеристики конденсаторной установки

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, кВ	0,4
Номинальная мощность установки, кВАр	100
Номинальная мощность ступеней, n x кВАр	10 x 10

Таблица 4.5 – Технические характеристики блока управления конденсаторной установкой

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	220
Точность измерения напряжения, %	± 1
Точность измерения тока, %	± 1
Количество выходных реле	10

Итак, САУ КРМ реализована на программируемом логическом контроллере, который управляет тиристорным возбудителем и вычисляет коэффициент реактивной мощности подстанции. Датчиками мощности являются МПУ ячеек, которые связаны с программируемым логическим контроллером (ПЛК) посредством высокоскоростного порта *Ethernet*.

Структурная схема САУ КРМ ЭТК с элементами технической реализации, где контур регулирования тока возбуждения синхронного двигателя построен с помощью тиристорного возбудителя, а контур регулирования величины коэффициента реактивной мощности реализован на ПЛК 200, представлена на рис. 4.2.

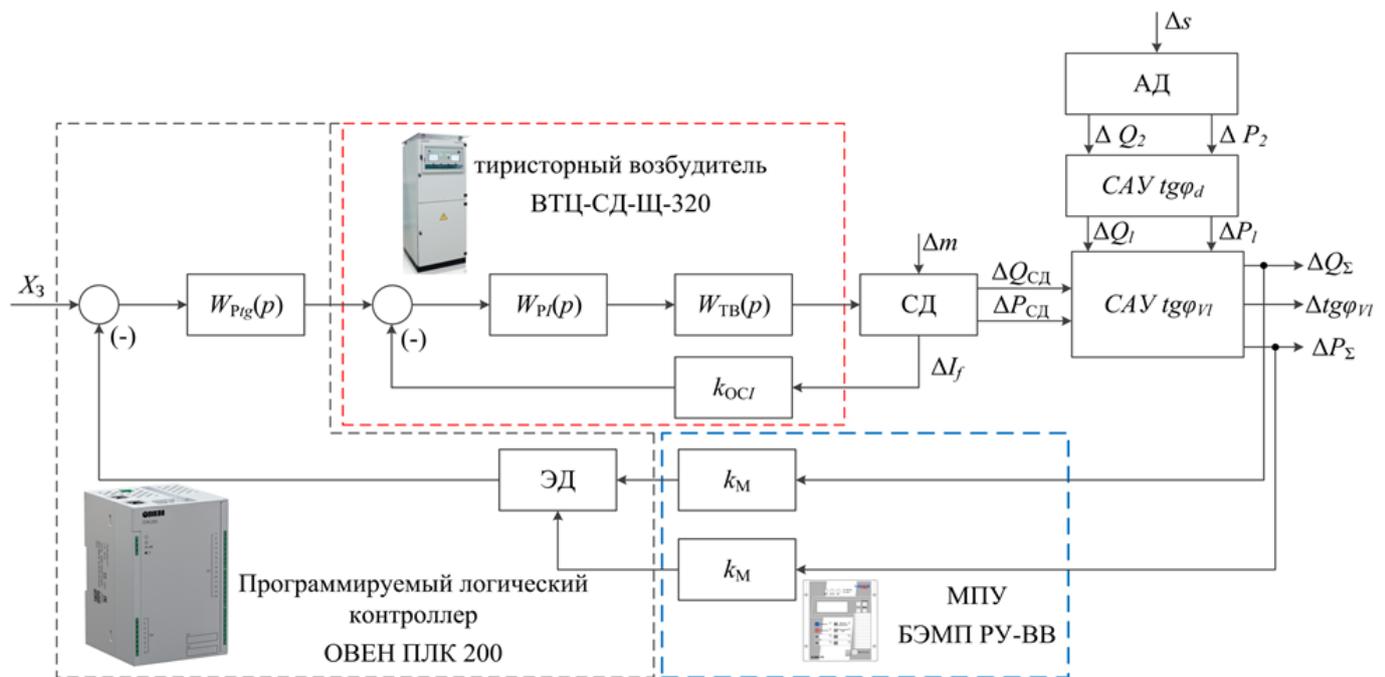


Рисунок 4.2 – Структурная схема САУ КРМ ЭТК в варианте технической реализации

Внешний вид трансформаторной подстанции с закрытым распределительным устройством (ЗРУ), оборудованным ячейками КСО-298 с МПУ БЭМП, а также совмещенного с ним РУНН с тиристорным возбудителем, представлен на рис. 4.3

Релейный шкаф РУНН, оборудованный ПЛК 200, на котором реализован контур регулирования величины коэффициента реактивной мощности, представлен на рис. 4.4

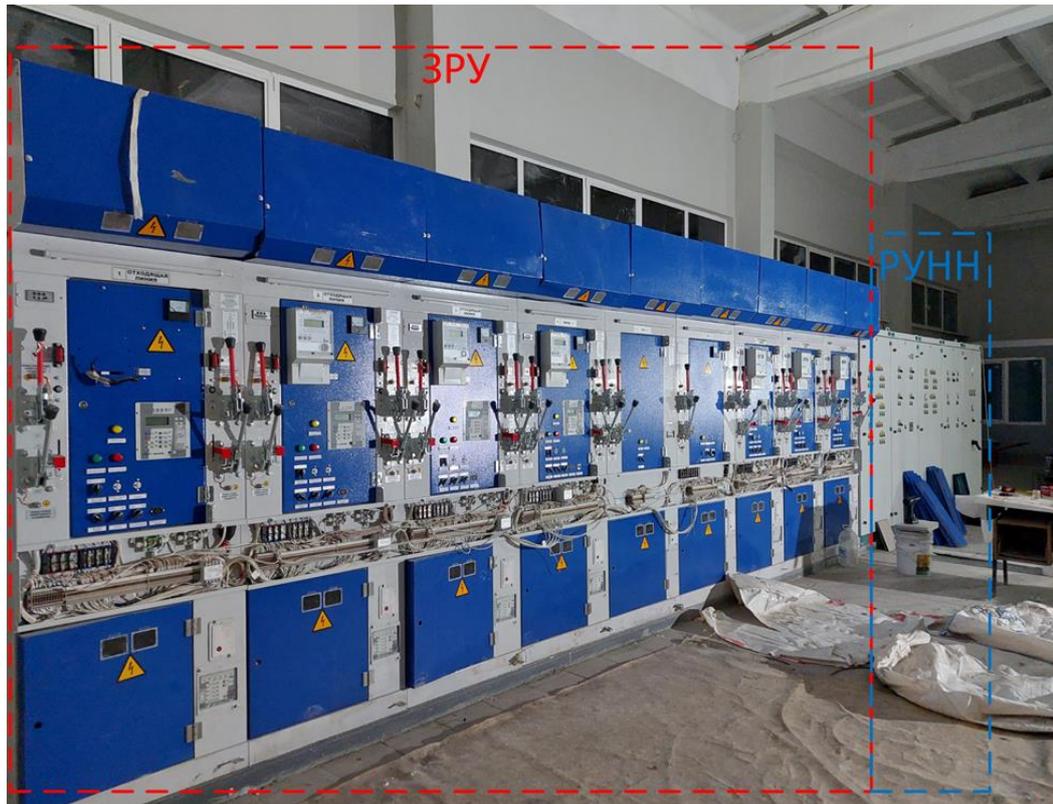


Рисунок 4.3 – Внешний вид ЗРУ оборудованного САУ КРМ ЭТК

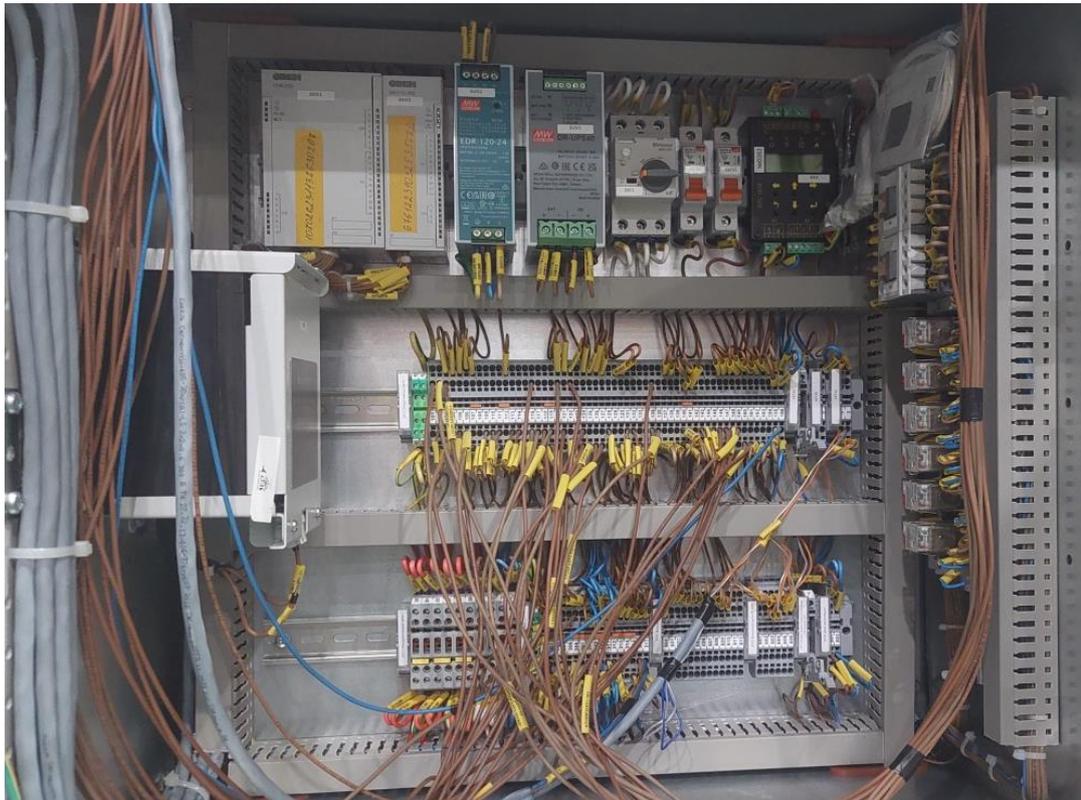


Рисунок 4.4 – Внешний вид релейного шкафа с ПЛК 200

Программа, исполняемая программируемым логическим контроллером, выполнена в программном обеспечении CODESYS 3.5 в виде функциональной логической схемы (POU) представленной на рис. 4.5

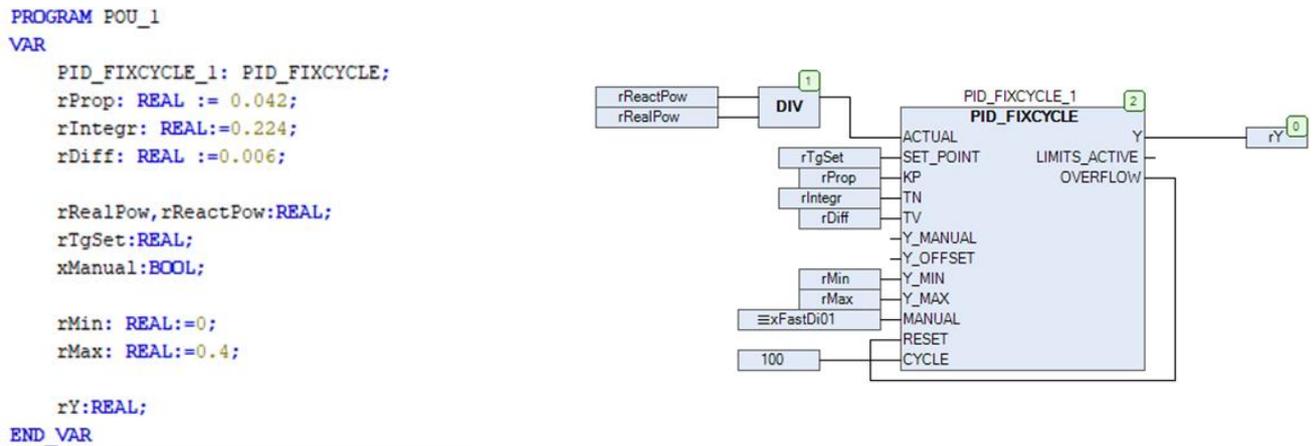


Рисунок 4.5 – Функциональная логическая схема контроллера ПЛК-200

Техническая реализация двухконтурной САУ КРМ ЭТК на существующем оборудовании подстанции показывает, что внедрение двухконтурной САУ не требует существенной модернизации оборудования и вполне может быть реализовано на имеющейся инфраструктуре.

4.2. Экономическое обоснование САУ КРМ ЭТК с программным управлением

Потребители электрической энергии в зависимости от условий, прописанных в договоре на поставку электрической энергии, ограничены в потреблении реактивной мощности посредством определения предельного значения величины коэффициента реактивной мощности [34-36]. При несоблюдении установленных предельных значений коэффициента реактивной мощности, согласно договору на поставку электрической энергии [58, 98], рассчитывается повышающий коэффициент к тарифу на электрическую энергию [35], либо вводятся иные штрафные санкции.

Расчет повышающих и понижающих составляющих коэффициента к тарифу на электрическую энергию нормируется методикой Федеральной службы по

тарифам (приказ от 31 августа 2010 г. №219-э/6) зарегистрированной в Министерстве Юстиции РФ 6 октября 2010 г. №18637, с учетом введенных предельных значений коэффициента реактивной мощности приказом Министра энергетики РФ №380 от 23 июня 2015 г [35, 11].

Существует три возможных варианта потребления реактивной мощности, и соответственно, три варианта расчета значений коэффициента K_i к тарифу.

Первый вариант заключается в отсутствии компенсирующих устройств и несоблюдении коэффициента реактивной мощности. В таком случае к коэффициенту тарифа за потребленную электроэнергию добавляется, повышающая составляющая

$$K_1 = 1 + 0.2(tg\varphi_{БСН} - tg\varphi_{П})d_{БСН}, \quad (4.1)$$

где $tg\varphi_{БСН}$ – среднее значение фактического коэффициента реактивной мощности в часы БСН, определенное расчетными счетчиками электрической энергии; $tg\varphi_{П}$ – предельное значение коэффициента реактивной мощности в часы БСН, для среднего напряжения $tg\varphi_{П} = 0,4$; $d_{БСН}$ – отношение энергии, потребленной в часы БСН к общему количеству потребленной энергии.

Второй вариант предполагает использование САУ КРМ ЭТК с программным управлением и соблюдении предельных значений КРМ. В таком случае повышающая составляющая к тарифному коэффициенту не применяется и повышающий коэффициент равен единице.

Третий вариант реализуется, если у потребителя электрической энергии есть техническая возможность участвовать в регулировании реактивной мощности, и она зафиксирована в договоре на поставку электрической энергии. Тогда составляющая снижения тарифа на время регулирования коэффициента реактивной мощности

$$K_3 = 1 - 0.2(tg\varphi_3 - tg\varphi_{БСН})d_{БСН}, \quad (4.2)$$

где $tg\varphi_3$ – верхняя граница диапазона регулирования коэффициента реактивной мощности для часов БСН.

Стоимость электрической энергии для промышленного предприятия определяется исходя из стоимости электрической энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности (ОРЭМ), сбытовой надбавкой, стоимостью услуг по передаче электрической энергии и услуг инфраструктурных организаций.

$$S_{\text{э/э}} = S_{\text{ОРЭМ}} + S_{\text{у}} + S_{\text{СН}} + S_{\text{ИО}} \quad (4.3)$$

где $S_{\text{ОРЭМ}}$ – стоимость электроэнергии на ОРЭМ; $S_{\text{у}}$ – стоимость услуг по передаче электроэнергии; $S_{\text{СН}}$ – сбытовая надбавка; $S_{\text{ИО}}$ – стоимость услуг инфраструктурных организаций (составляет примерно 0,1% от $S_{\text{э/э}}$).

Согласно информации с сайта ОРЭМ [49] для Самарской области $S_{\text{ОРЭМ}} = 1,553$ руб./кВт·ч, стоимость услуг энергоснабжающей организацией определяются приказом «Об установлении единых котловых тарифов на услуги по передаче электрической энергии по сетям Самарской области на 2023-2027 годы» №848 от 22.11.2022 [36], $S_{\text{у}} = 1,7821$ руб./кВт·ч, сбытовая надбавка обычно устанавливается равной 5%. Таким образом, цена электроэнергии для промышленного предприятия подключенного к сети среднего напряжения в Самарской области

$$S_{\text{э/э}} = 1,553 + 1,7821 + 0,1668 + 0,035 = 3,54 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч.}$$

В рассматриваемой в работе ЭТК НСМ (рис. 2.2), оборудованной САУ КРМ ЭТК (рис. 4.2), исходные данные необходимые для расчета экономической эффективности внедрения САУ можно разделить на общие данные - $P_{\text{ср}} = 670$ кВт; $d_{\text{БСН}} = 0,782$; $\text{tg}\varphi_{\text{П}} = \text{tg}\varphi_{\text{З}} = 0,4$. А также данные для трех вариантов:

- 1) отсутствие управления реактивной мощностью $K_1 = 1,01$;
- 2) управление реактивной мощностью в функции соблюдения предельного значения коэффициента реактивной мощности $K_2 = 1$;
- 3) компенсация реактивной мощности у поставщика электрической энергии $K_3 = 0,98$; $\text{tg}\varphi_{\text{БСН}} = 0,3$.

Стоимость электроэнергии для промышленного предприятия, работающего по непрерывному циклу в течение года

$$C_i = S_{\text{Э/Э}} \cdot P_{\text{CP}} \cdot K_i \cdot T_B \quad (4.4)$$

где T_B – количество часов работы предприятия в год, ч., $T_B = 8760$ ч.; K_i – значение коэффициента к тарифу за электроэнергию.

Таким образом, экономию электроэнергии Э_i и денежных средств C_i можно определить, сравнивая значение стоимости электроэнергии, полученное при использовании САУ КРМ ЭТК и без нее. Данные расчетов сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Экономическая эффективность использования САУ КРМ ЭТК

Способ управления РМ	Без компенсации РМ	Использование САУ КРМ ЭТК	Регулирование $tg\varphi$ у поставщика Э/Э
K_i	1,01	1	0,98
C_i , тыс. руб	20984,737	20776,968	20361,428
Э_i , тыс. руб	0	207,769	623,309

Из анализа данных следует, что внедрение системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения оправдано с целью поддержания требуемых значений КРМ (второй вариант) и дает экономию 207769 рублей или примерно 1% в год от стоимости электроэнергии. Использование САУ КРМ ЭТК с программным управлением для регулирования реактивной мощности у поставщика электрической энергии (третий вариант) позволяет получить экономию 623309 рублей или 3% в год.

4.3. Экспериментальная установка и исследование трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности

С целью верификации полученной модели силового трансформатора (2.8), как объекта управления коэффициентом реактивной мощности требуется провести физический эксперимент на лабораторной установке. Поскольку модель (2.8) описывает стационарный режим работы трансформатора, то использование трансформатора малой мощности для верификации модели является оправданным.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 4.6.

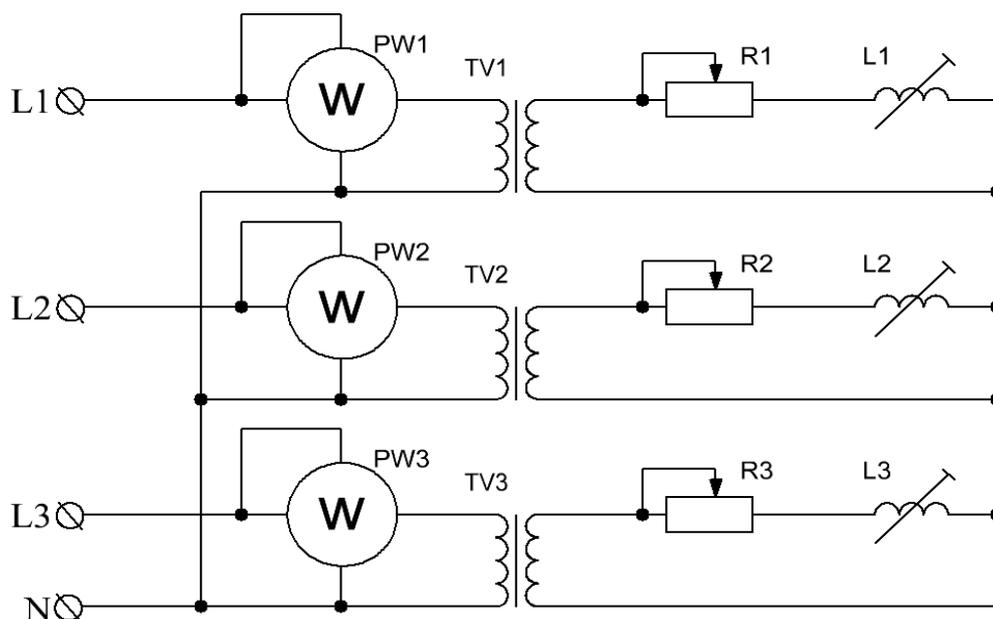


Рисунок 4.6 – Принципиальная схема трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности

В состав экспериментальной установки входят следующие основные элементы:

- силовой трансформатор T_1 ТПК-125-Л537, имеющий следующие характеристики: номинальная мощность $S_H = 125$ Вт, $P_{xx} = 2$ Вт, $I_{xx}\% = 7,2\%$, $U_K = 6,6\%$, $U_{H1} = 220$ В, $U_{H2} = 220$ В;

- мультиметр $PW_1 - PW_3$ типа ИМС-Ф1 [15] с возможностью измерения напряжения, силы тока, активной и реактивной мощности и $\cos\phi$;

- магазин сопротивлений $R_1 - R_3$ с шагом по мощности в $P = 6$ Вт;

- магазин индуктивностей $L_1 - L_3$ с шагом по мощности в $Q = 4$ ВАр.

Измерительные ветви тока и напряжения мультиметров $PW_1 - PW_3$ включены в цепи обмотки высшего напряжения U_{H1} трансформатора T_1 . В качестве нагрузки на стороне низшего напряжения U_{H2} трансформатора используются последовательно включенные активно-индуктивные сопротивления, шаг которых известен. Максимальная активная мощность магазинов сопротивлений $R_1 - R_3$ 21-24 Вт, максимальная реактивная мощность магазинов индуктивностей $L_1 - L_3$ 22 ВАр.

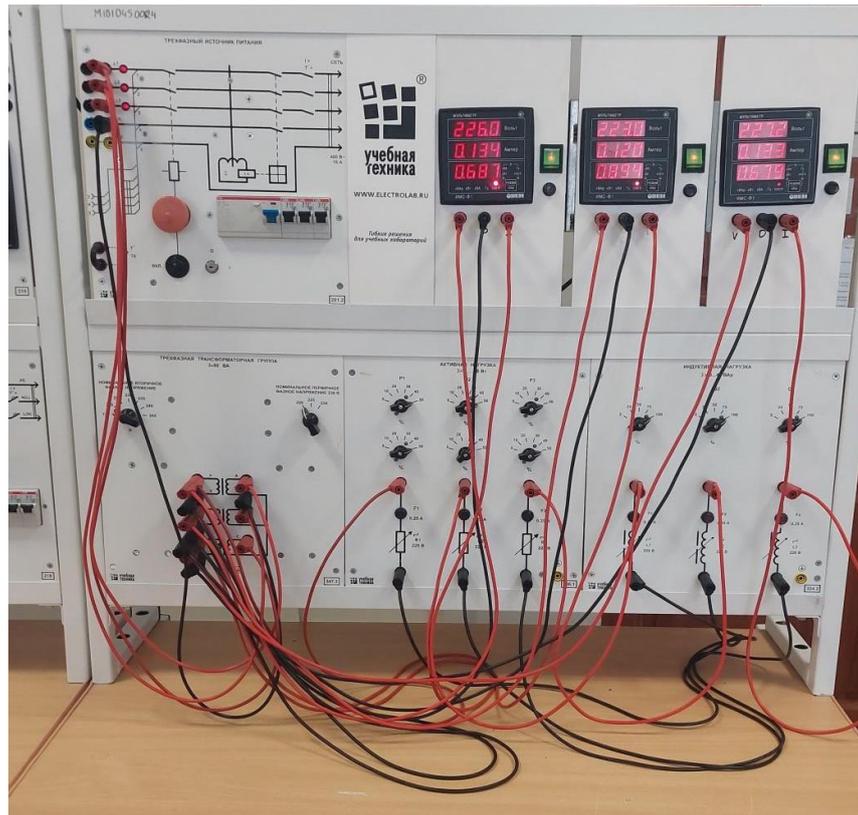


Рисунок 4.7 – Внешний вид экспериментальной установки

Математическая модель статического режима трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности (2.8) представлена на рис. 2.6, компьютерная модель, реализованная в MATLAB Simulink на рис. 2.7.

Значения активной и реактивной мощностей нагрузки трансформатора T_1 для проведения эксперимента на реальном трансформаторе и на вычислительной модели представлены в таблице 4.7. Значения активной и реактивной мощностей на стороне высшего напряжения трансформатора T_1 , полученные в результате измерений с нагрузкой, приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.7 – Нагрузка на стороне НН экспериментальной установки

Номер эксперимента	1	2	3	4	5
Q , ВАр	9	14	17	20	22
P , Вт	4	10	16	20	21

Таблица 4.8 – Активная и реактивная мощности на стороне ВН трансформатора

Номер эксперимента	1	2	3	4	5
Q_r , ВАр	18	24	28	32	34
P_r , Вт	7	13	20	25	27

Для удобства анализа полученных экспериментальных данных переведем их в графический вид и сравним с графиками, полученными в результате вычислительного эксперимента. Для этого используем функцию Signal Builder программного комплекса MATLAB Simulink.

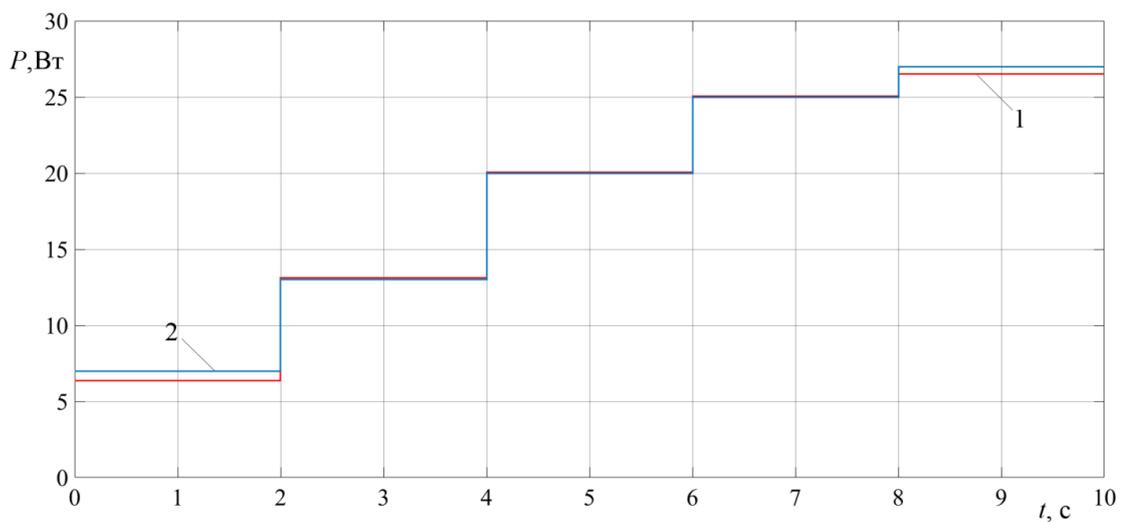


Рисунок 4.8 – Графики активной мощности, полученные в результате эксперимента и на модели: 1 – модель; 2 – эксперимент

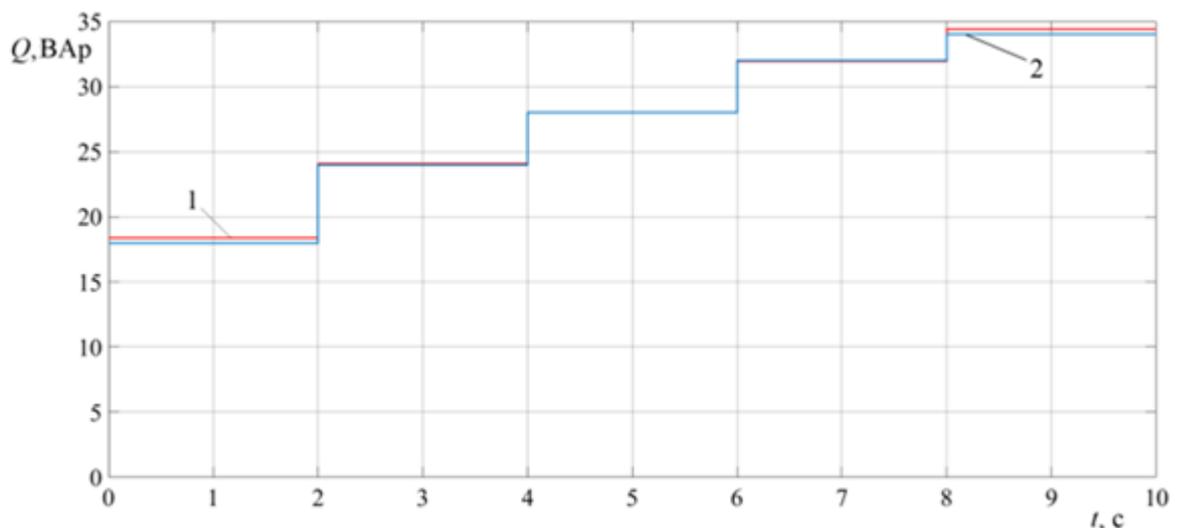


Рисунок 4.9 – Графики реактивной мощности, полученные в результате эксперимента и на модели: 1 – модель; 2 – эксперимент

Из анализа графиков, представленных на рис. 4.8 и 4.9 видно, что результаты эксперимента и данные, полученные в результате вычислений по модели (2.8) дают результат, отличающийся друг от друга менее чем на 3%. Максимальная погрешность по величине активной мощности 3%, а по реактивной мощности 2%, что свидетельствует об адекватности математической модели трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности.

Поскольку математические модели трансформаторной подстанции, оборудованной САУ $tg\varphi_d$ (2.17) и САУ $tg\varphi_V$ (2.23), получены в результате простых математических преобразований, то исходя из результатов, полученных выше, можно сделать вывод об адекватности и этих моделей.

4.4. Исследование САУ КРМ ЭТК в системе моделирования энергосистем PSCAD

Исследования полученных линеаризованных моделей системы электроснабжения как объекта управления коэффициентом реактивной мощности (рис. 3.13 и 3.14) и системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности с обратной связью по коэффициенту реактивной мощности было проведено в системе моделирования процессов в энергетических системах PSCAD компании Manitoba Hydro International. Достоинствами данного программного обеспечения являются использование верифицированных и апробированных моделей, основанных на схемах замещения электротехнического оборудования, быстрота компиляции кода, высокая производительность и, в отличие от SimScape (SimPowerSystems), PSCAD узкоспециализирован на моделировании электротехнических и электроэнергетических процессов в системах электроснабжения.

В PSCAD был смоделирован ЭТК НСМ, включающий в себя модели трансформаторной подстанции 35/6,3 кВ (Т 1.1) с нагрузкой в виде синхронного электропривода, статической активно-индуктивной нагрузки и трансформаторной подстанции 6,3/0,4 кВ (Т 1.2). Трансформаторная подстанция 6,3/0,4 кВ

нагружена двумя мощными асинхронными электроприводами и статической активно-индуктивной нагрузкой, при этом один из электроприводов подключен через автоматический выключатель. Модель, включающая в себя помимо силовых компонентов элементы управления, представлена на рис. 4.10.

В модели заданы следующие параметры:

1. для трансформатора Т1.1 $U_1/U_2 = 35/6$ кВ марки ТМ-2500/35-У1 [78] номинальная мощность $S_H = 2,5$ МВА, частота $f = 50$ Гц, схема соединения обмоток Y/D, потери холостого хода $P_C = 1,56 \cdot 10^{-3}$ отн. ед., потери короткого замыкания $P_K = 6,6 \cdot 10^{-3}$ отн. ед., напряжение на стороне ВН $U_1 = 35$ кВ, напряжение на стороне НН $U_2 = 6,3$ кВ;

2. для трансформатора Т1.2 марки ТМ 1600/6-У1 [78] номинальная мощность $S_H = 1,6$ МВА, частота $f = 50$ Гц, схема соединения обмоток D/Y, потери холостого хода $P_C = 1,4 \cdot 10^{-3}$ отн. ед., потери короткого замыкания $P_K = 10 \cdot 10^{-3}$ отн. ед., напряжение на стороне $U_1 =$ ВН 6,3 кВ, напряжение на стороне НН $U_2 = 6,3$ 0,4 кВ;

3. для синхронного двигателя марки СТД-630-23УХЛ4 [64, 79] фазное напряжение $U_1 = 3,64$ кВ, номинальный ток $I_H = 70,8$ А, угловая частота $\omega_H = 314,159265$ рад/с, постоянная инерции $T_J = 0,09$ с., постоянная времени якоря $T_J = 0,035$ с., индуктивное сопротивление синхронного двигателя в продольной оси $X_d = 1,81$ отн.ед., ненасыщенное переходное реактивное сопротивление $X_d' = 22$ отн. ед., постоянная времени $T_{d0} = 2,51$ с., субпереходное сопротивление $X_d'' = 0,0392$ отн. ед., субпереходная постоянная времени $T_{d0}' = 0,039$ с., индуктивное сопротивление по поперечной оси $X_q = 0,82$ отн. ед., субпереходное сопротивление по поперечной оси $X_q' = 0,24$ отн.ед., субпереходная постоянная времени поперечной оси $T_{q0}' = 0,4$ с.;

4. для асинхронных двигателей марки АИР355М4 [93] фазное напряжение $U_1 = 0,23$ кВ, фазный ток $I_H = 0,559$ кА, скорость вращения магнитного поля $\omega_H = 314,15$ рад/с, номинальный $\cos\phi = 0,92$, номинальный К.П.Д. $\eta_H = 0,945$, номинальное скольжение $s_H = 0,013$ отн. ед., кратность пускового тока $K_I = 5$, кратность пускового момента $M_{II} = 2$, кратность

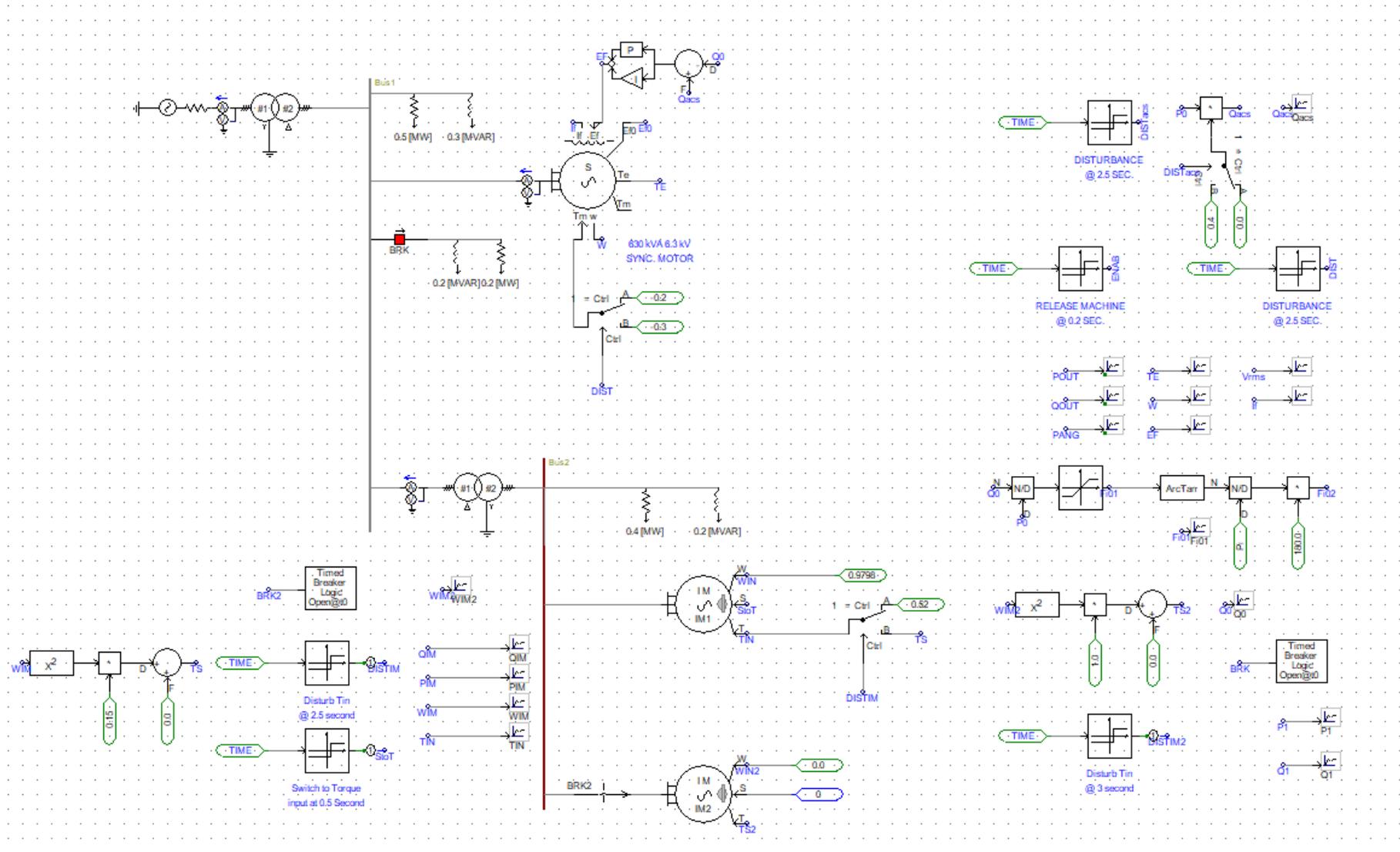


Рисунок 4.10 – Модель ЭТК НСМ реализованная в PSCAD

максимального момента $M_k = 2,2$, число пар полюсов 2, момент инерции ротора $J = 8,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;

5. статическая нагрузка трансформатора T1.1 задается в виде активной и индуктивной нагрузки мощностью $P = 0,5 \text{ МВт}$ и $Q = 0,3 \text{ МВАр}$, соответственно, с номинальным напряжением $U_H = 6,3 \text{ кВ}$;

6. статическая нагрузка трансформатора T1.2 задается в виде активной и индуктивной нагрузки мощностью $P = 0,4 \text{ МВт}$ и $Q = 0,2 \text{ МВАр}$, соответственно, с номинальным напряжением $U_H = 0,4 \text{ кВ}$;

переменная нагрузка трансформатора T1.1, подключаемая через выключатель, задается в виде активной и индуктивной нагрузки мощностью $P = 0,2 \text{ МВт}$ и $Q = 0,2 \text{ МВАр}$, соответственно, с номинальным напряжением $U_H = 6,3 \text{ кВ}$.

Сделаем некоторые замечания, касающиеся последовательности моделирования, подключения синхронного и асинхронных двигателей, источника питания схемы электроснабжения, которые не влияют на точность полученных результатов.

При подаче питания от источника к потребителям в начальный момент времени напряжение на клеммах источника и трансформатора T1.1 равно нулю. Далее за временной промежуток в 0,05 с., напряжение источника плавно увеличивается до номинального значения 35 кВ. Соответственно оно увеличивается и на вторичных обмотках трансформаторов T1.1 и T1.2. Это является важным замечанием, т.к. в отличие от программного пакета MATLAB Simulink, где есть возможность задать начальные условия и моделировать от начального момента времени, в PSCAD моделируются реальные физические процессы в энергосистемах, включающие в себя подачу напряжения от источника питания. Поэтому переходные процессы по управляющему и возмущающему воздействиям здесь не могут быть получены от начального момента времени. Графики в PSCAD получены от момента подачи управляющего, либо возмущающего воздействия в

произвольный момент времени после перехода ЭТК в установившееся состояние.

Для синхронного двигателя важным моментом является моделирование процесса запуска и инициализации. В начальный момент времени синхронный двигатель моделируется в виде источника, напряжение на якоре которого равно заданному. Напряжение возбуждения подается мгновенно. Частота вращения ротора машины равна номинальной. В таком состоянии машина находится до момента инициализации. В момент инициализации (в модели схемы электроснабжения ЭТК 0,2 с.) модель синхронного двигателя переключается на модель с постоянным моментом и функционирует как обычный синхронный двигатель при неизменных скорости и моменте. Такой подход к моделированию необходим для того, чтобы синхронная машина инициировалась в тот момент, когда все переходные процессы связанные с подачей напряжения в систему уже завершились.

Асинхронный двигатель моделируется в двух вариантах. Первый вариант - инициализация из рабочего режима, второй – режим пуска. В первом варианте асинхронный двигатель, начиная с начального момента времени, работает при постоянной скорости, которая для двигателя IM1 в модели равна $0,9796 \cdot n_{\text{ном}}$. Затем, в момент инициализации (для двигателя IM1 0,5 с), режим работы двигателя с постоянной скоростью заменяется режимом работы с постоянным моментом. Нагрузка двигателя вентиляторная, т.к. исполнительным механизмом является насос.

Режим пуска асинхронного двигателя IM2 моделируется следующим образом. В начальный момент времени у асинхронного двигателя скорость вращения и момент равны нулю, машина при этом моделируется как источник напряжения с последовательно включенным резистором. При замыкании выключателя BRK2 ($t = 20$ с.) происходит включение двигателя и его разгон до номинальной частоты вращения.

В качестве средства анализа характеристик модели и сравнения ее с линеаризованной моделью из MATLAB Simulink используется график

коэффициента реактивной мощности. При этом в процессе исследования линеаризованной модели были получены графики переходного процесса величины коэффициента реактивной мощности по управляющему воздействию в виде изменения сигнала задания, и возмущающим воздействиям в виде изменений нагрузки на валах синхронного и асинхронного двигателей. Графики переходного процесса по управляющему воздействию в виде изменения сигнала задания представлены на рис. 4.11. Переходные процессы по возмущающему воздействию в виде изменения нагрузки на валу синхронного двигателя представлены на рис. 4.12, в виде изменения нагрузки на валу асинхронного двигателя - на рис. 4.13.

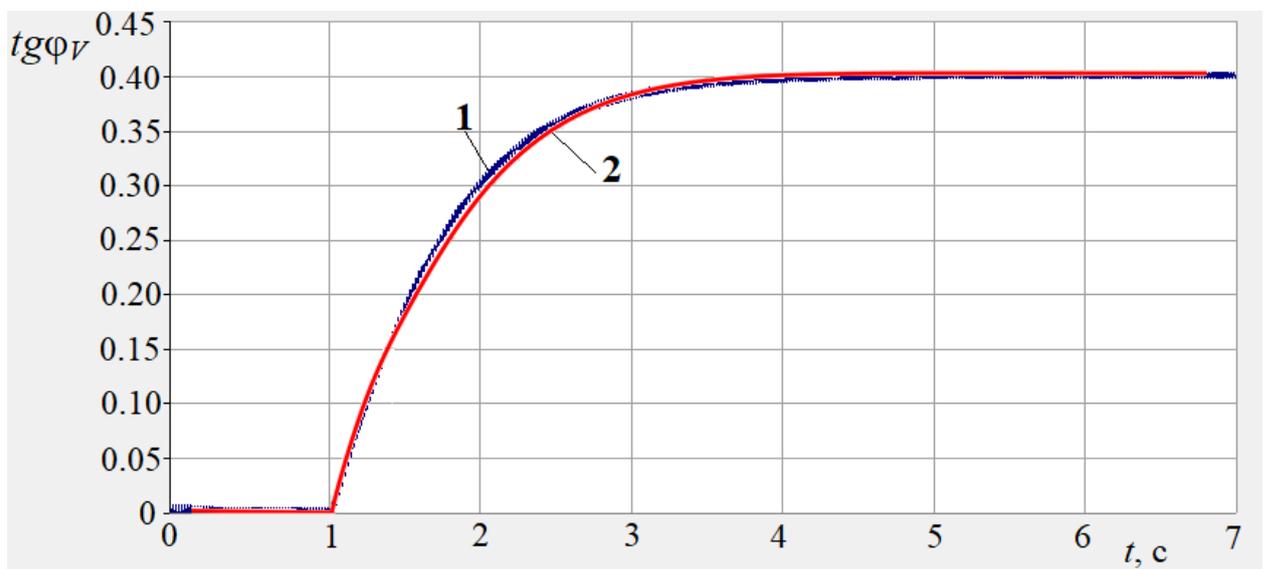


Рисунок 4.11 – Графики переходного процесса КРМ по управляющему воздействию: 1 –PSCAD; 2 –MATLAB Simulink

Из анализа рис. 4.11 видно, что при увеличении заданного значения величины коэффициента реактивной мощности с 0 до 0,4 оба графика дают близкие результаты и показатели качества переходного процесса в обоих случаях примерно одинаковы.

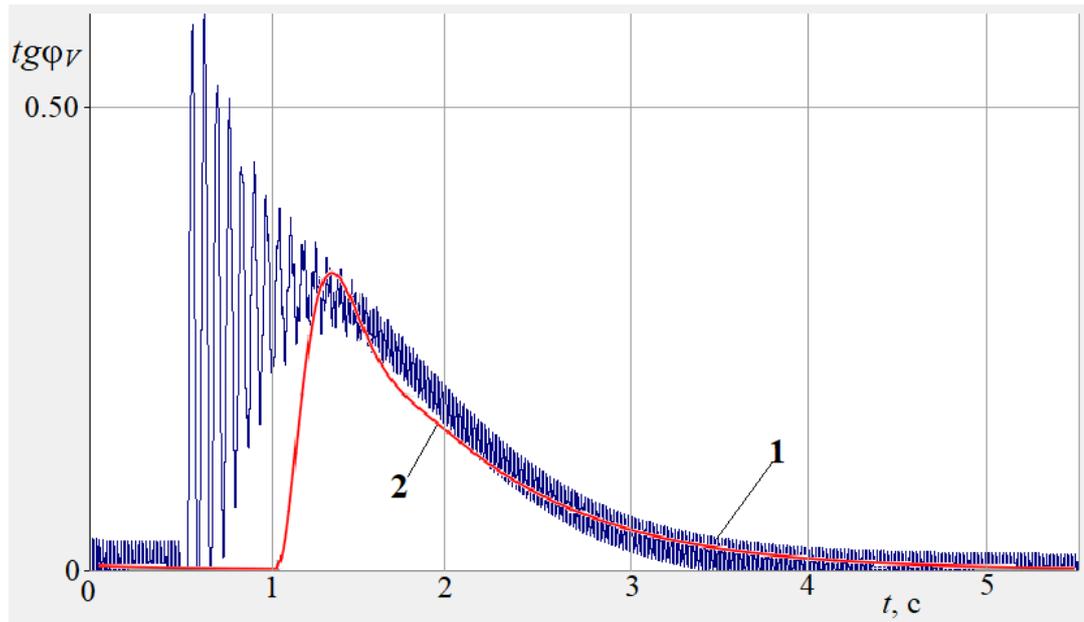


Рисунок 4.12 – Графики переходного процесса КРМ по возмущающему воздействию в виде наброса нагрузки на валу синхронного двигателя: 1 – PSCAD; 2 – MATLAB Simulink

Анализ графиков приведенных на рис. 4.12 показывает, что при увеличении момента статической нагрузки на валу синхронного двигателя перерегулирование при моделировании в PSCAD составляет примерно 3%, а при моделировании в MATLAB Simulink 2,75%, а время переходного процесса в обоих случаях равно 3с.

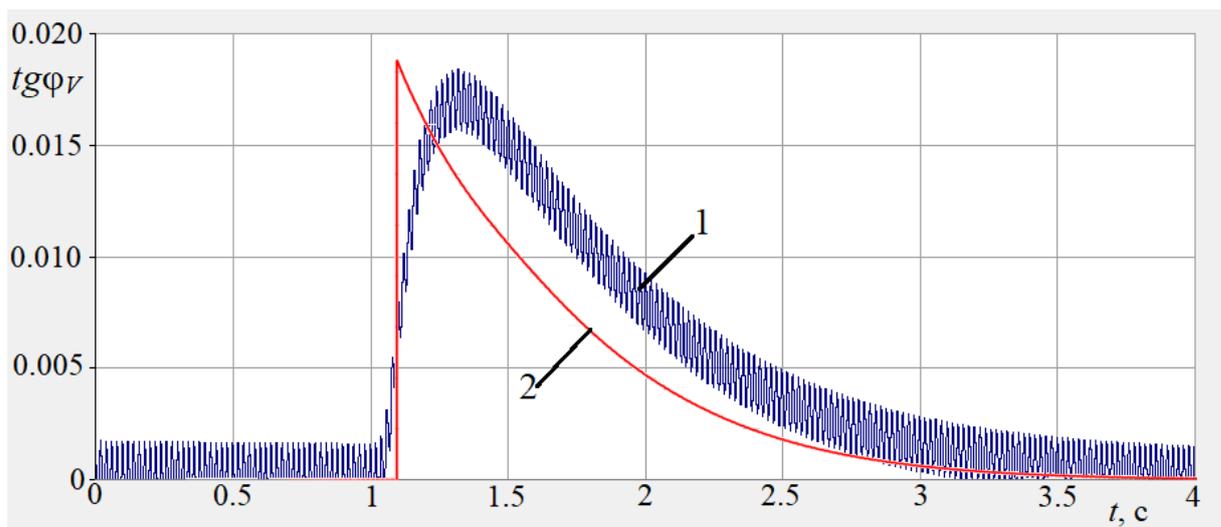


Рисунок 4.13 – Графики переходного процесса КРМ по возмущающему воздействию в виде наброса нагрузки на валу асинхронного двигателя: 1 – PSCAD; 2 – MATLAB Simulink

Анализ графиков приведенных на рис. 4.13 показывает, что при увеличении момента нагрузки на валу асинхронного двигателя перерегулирование при моделировании в PSCAD составляет примерно 4%, а при моделировании в MATLAB Simulink 4,37%, а время переходного процесса в обоих случаях равно 2с.

Отличие формы графиков (рис. 4.12, 4.13) объясняется тем, что в компьютерной модели PSCAD применены более точные модели, описывающие динамику протекающих электромагнитных процессов, а при реализации компьютерного моделирования в MATLAB и PSCAD использован разный шаг дискретизации. Однако указанные особенности не влияют на точность моделирования.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что графики переходных процессов линеаризованной модели, которая реализована в программном комплексе MATLAB Simulink, дают близкие результаты, отличающиеся менее, чем на 1% от результатов моделирования в программном комплексе PSCAD, где использованы внутренние апробированные модели. Компьютерная модель в программном комплексе PSCAD также учитывает дополнительные факторы в виде электромагнитных процессов протекающих в ЭТК НСМ, которые не учтены в линеаризованной модели, что объясняет несущественные отличия формы графиков полученных в результате моделирования в PSCAD. Наличие «шума» на графиках, полученных в PSCAD, объясняется тем, что значения активной и реактивной мощностей получены как произведение мгновенных значений напряжения и тока, которые сдвинуты друг относительно друга по фазе при активно-индуктивной нагрузке.

Исследование систем автоматического управления подразумевает исследование как в «малом» или малых отклонениях, так и в «большом» или больших отклонениях. При этом настройка системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности электротехнического комплекса, выполненная в программном комплексе MATLAB Simulink

реализована в малых отклонениях, но в ЭТК НСМ могут присутствовать и возмущающие воздействия в «большом». Эти возмущения обусловлены пуском мощного асинхронного электропривода и подключением мощной статической активно-индуктивной нагрузки. Следовательно, возникает необходимость проверки на устойчивость и качество динамических характеристик САУ КРМ ЭТК при воздействии возмущающих воздействий в виде пуска асинхронного электропривода и подключении мощной нагрузки.

С целью анализа поведения системы были получены графики переходного процесса по величине коэффициента реактивной мощности при пуске асинхронного электропривода с двигателем АИР355М4 (рис. 4.14) и подключении активно (200 кВт) - индуктивной нагрузки (200 кВАр) (рис. 4.15).

Анализ графика на рис. 4.14 показывает, что при возмущающем воздействии в виде пуска мощного асинхронного двигателя САУ КРМ ЭТК сохраняет свою устойчивость. Процесс пуска асинхронного двигателя длится примерно 2 с. В результате работы САУ получены следующие показатели качества переходного процесса: время переходного процесса $t_{\text{пн}} = 4$ с., перерегулирование $\sigma_{\text{пн}} = 150\%$. Перерегулирование по величине КРМ ЭТК в 150% не создает аварийной ситуации и не приводит к срабатыванию защит, т.к. согласно таблице 4.2, тиристорный возбудитель имеет возможность двукратной форсировки по току возбуждения.

Анализ графика на рис. 4.15 показывает, что при возмущающем воздействии в виде подключения активно-индуктивной нагрузки полной мощностью 280 кВА время переходного процесса составило $t_{\text{пн}} = 2$ с., перерегулирование $\sigma_{\text{пн}} = 17,5\%$.

Таким образом, в результате моделирования в программном комплексе PSCAD системы электроснабжения оборудованной САУ КРМ ЭТК были определены показатели качества переходных процессов. Показано, что

система является устойчивой и работоспособной при воздействии больших возмущений.

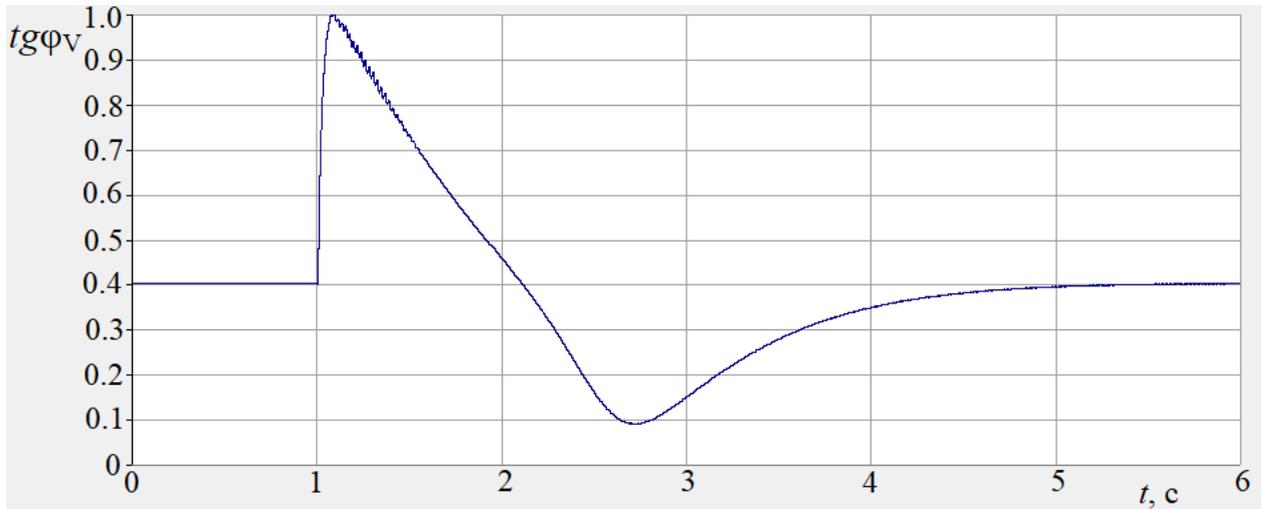


Рисунок 4.14 – График переходного процесса КРМ по возмущающему воздействию при пуске асинхронного двигателя.

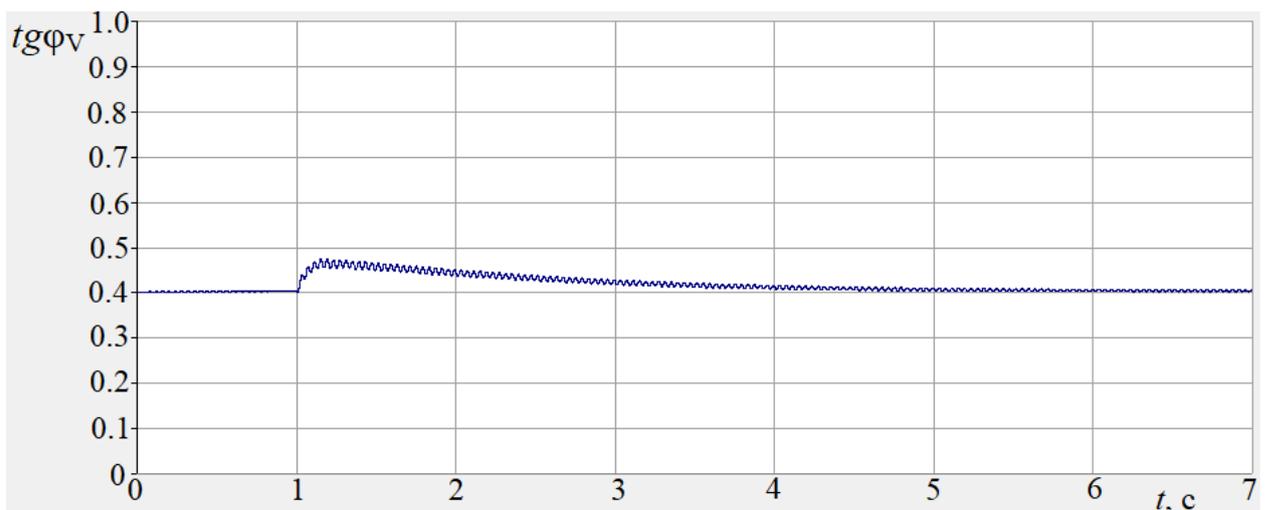


Рисунок 4.15 – График переходного процесса КРМ по возмущающему воздействию при подключении активно-индуктивной нагрузки.

4.5. Выводы по четвертой главе

В ходе определения экономической эффективности использования САУ КРМ ЭТК и верификации синтезированной системы управления получены следующие результаты:

1. Предложен вариант технической реализации САУ КРМ ЭТК, в которой обратная связь системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности регулируется по измерению величин активной и реактивной мощности микропроцессорными устройствами релейной защиты и автоматики.

2. Показано, что применение системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности с программным управлением позволяет повысить эффективность управления величиной коэффициента реактивной мощности электротехнического комплекса с синхронным электроприводом. Повышение эффективности выражается в снижении тарифного коэффициента на 3%. Экономический эффект при участии предприятия в регулировании реактивной мощности в энергосистеме составляет 623 тыс. рублей в год.

3. Доказано, что расчетные переходные характеристики трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности с погрешностью, не превышающей 3%, совпадают с экспериментальными.

4. В результате моделирования в программном комплексе PSCAD определены показатели качества переходных процессов, проверены работоспособность и устойчивость САУ в «большом».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Получена математическая модель трансформаторной подстанции с системой автоматического регулирования коэффициента реактивной мощности на стороне высшего напряжения и синхронным двигателем в качестве источника реактивной мощности. Показано, что управление коэффициентом реактивной мощности в часы больших суточных нагрузок имеет погрешность менее 1%, а в часы малых суточных нагрузок менее 5%.

2. Разработана математическая модель электротехнического комплекса предприятия, позволяющая с помощью более точного динамического отслеживания потерь активной и реактивной мощности в элементах системы, управлять коэффициентом реактивной мощности и до 10% повысить его значение в часы больших суточных нагрузок.

3. Определены параметры Т-образной схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным, на основании которых получена математическая модель асинхронного двигателя как возмущающего воздействия на коэффициент реактивной мощности системы электроснабжения.

4. Определены параметры системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности промышленного предприятия за счет регулирования напряжения возбуждения синхронного электродвигателя, позволяющие обеспечить отсутствие перерегулирования по управляющему воздействию и обеспечить быстрое действие при отработке возмущающего воздействия в 4 с.

5. Синтезирована САУ КРМ ЭТК с синхронным электроприводом, применение которой позволяет уменьшить плату за электрическую энергию за счет выполнения требований к предельному значению КРМ и получить экономический эффект от участия в регулировании реактивной мощности в размере 623 тысячи рублей в год, что составляет 3% от стоимости электроэнергии.

Рекомендации

Полученные результаты рекомендуется внедрить на предприятиях нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности, а также на предприятиях иных отраслей промышленности и сельского хозяйства, электротехнические комплексы которых обеспечивают электроэнергией мощные асинхронные и синхронные электродвигатели.

Рекомендуется при построении системы автоматического регулирования коэффициента реактивной мощности предприятия использовать для контроля сигналы на стороне высокого напряжения трансформатора ГПП.

Основные результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при проведении и подготовке занятий по дисциплинам электротехнических специальностей.

Перспективы дальнейшей разработки

Дальнейшее развитие темы управления коэффициентом реактивной мощности может быть направлено на:

— создание систем автоматического управления режима электроснабжения с дискретно-непрерывным алгоритмом управления, когда во время интенсивного потребления реактивной мощности осуществляется параллельная работа синхронных двигателей и конденсаторных батарей;

— введение в структуру систем автоматического управления различных компенсирующих связей (по мощности нагрузки на стороне низшего напряжения трансформатора при известном изменении возмущающего воздействия);

— синтез систем автоматического управления по различным критериям оптимальности: минимуму отклонения нескольких параметров, минимальному значению коэффициента реактивной мощности.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АД – асинхронный двигатель

АРВ – автоматический регулятор возбуждения

БСН – больших суточных нагрузок

ВН – высшего напряжения

ЗРУ – закрытое распределительное устройство

ИВМО – интеграл от взвешенного модуля сигнала ошибки

КМ – коэффициент мощности

КРМ – коэффициент реактивной мощности

КРТВ – контур регулирования тока возбуждения

КТП – комплектная трансформаторная подстанция

КУ – конденсаторная установка

МСН – малых суточных нагрузок

НН – низшего напряжения

ОРЭМ – объединенный рынок электроэнергии и мощности

ПЛК – программируемый логический контроллер

РМ – реактивная мощность

РУНН – распределительное устройство низкого напряжения

САУ – система автоматического управления

ЭТК – электротехнический комплекс

СД – синхронный двигатель

ЭТК НП – электротехнический комплекс нефтепромыслов

ЭТК НСМ – электротехнический комплекс насосных станций мелиорации

УН – узел нагрузки

СН – среднее напряжение

ТП – трансформаторная подстанция

УКРМ – устройство компенсации реактивной мощности

ЭДС – электродвижущая сила

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ильяшов, В. П. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок / В. П. Ильяшов. — М. : Энергия, 1977. — 104 с.
2. Красник, В. В. Автоматические устройства по компенсации реактивных нагрузок в электросетях предприятий / В. В. Красник. — М. : Энергоавтомиздат, 1983. — 136 с.
3. Петелин, Д. П. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей / Д. П. Петелин. — Библиотека по автоматике, выпуск 30. изд. — М. Л. : Госэнергоиздат, 1961. — 193 с.
4. Петелин, Д. П. Автоматическое управление синхронными электроприводами / Д. П. Петелин. — М. : Энергия, 1968. — 193 с.
5. Макеев, М. С. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М. С. Макеев, А. А. Кувшинов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. — 2013. — № 1(23). — С. 108-112.
6. Маклаков, А. С. Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности / А. С. Маклаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. — 2013. — Т. 1, № 1. — С. 43-50.
7. Кравчик, А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 504 с. Леонов Г.А. Введение в теорию управления / СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2004. 218 с.
8. Леонов, Г. А. Введение в теорию управления / Г. А. Леонов. — СПб. : Изд-во СПб. ун-та, 2004. — 218 с.
9. Лащенков, М. Б. Влияние систем управления возбуждением синхронного двигателя на самозапуск при кратковременной потере питания / М. Б. Лащенков, Ю. В. Шевырев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника,

информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 37. – С. 121-136.

10. Кирилин, И. В. Выбор средств управления реактивной мощностью в системах электроснабжения предприятий цветной металлургии / И. В. Кирилин, П. М. Козлов // Промышленная энергетика. – 2010. – № 8. – С. 46-52.

11. Шульга, К. С. Групповое управление параметрами синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности и регулирования режимов электрических сетей / К. С. Шульга // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Двадцать второй Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 3 томах, Москва, 25–26 февраля 2016 года. Том 3. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – С. 293.

12. Стулов, А. Д. Двухконтурная система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности / А. Д. Стулов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 29 февраля – 02 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2024. – С. 1206.

13. Котенев, В. И. Дискретно-аналоговая система управления напряжением узла нагрузки / В. И. Котенев, В. В. Кочетков // Инновационные технологии в энергетике : сборник статей 2 Международной научно-практической конференции, Пенза, 28 октября 2014 года / Под редакцией В.Я. Горячева. – Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2014.

14. Андриевский, Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 1999. — 467 с.

15. ООО «ОВЕН». ИМС-Ф1. Мультиметр. / Руководство по эксплуатации. КУВФ.411135.003 РЭ.
16. Николаев, А. А. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривозовского электроснабжения / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, М. М. Тухватуллин и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2014. – Т. 2. – С. 86-90.
17. Ильяшов, В. П. Конденсаторные установки промышленных предприятий / В. П. Ильяшов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 152 с.
18. Фрадков, А. Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры / А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2003. — 208 с.
19. Котенев, В. И. Математическая модель синхронной машины при управлении ее возбуждением / В. И. Котенев, А. В. Котенев, В. С. Осипов, В. В. Кочетков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 2(34). – С. 128-135.
20. Котенев, В. И. Математическая модель синхронного двигателя в электрической сети с нестабильным напряжением / В. И. Котенев, В. В. Кочетков, Д. А. Елькин // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы VII международной научно-практической конференции, Саратов, 18 апреля 2016 года / Под общей редакцией Трушкина В.А.. – Саратов: ООО "Центр социальных агроинноваций СГАУ", 2016. – С. 105-106.
21. Кочетков, В. В. Математическая модель синхронного двигателя как объекта управления его реактивной мощностью / В. В. Кочетков. // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. Тез. докл. III Всеросс. науч.-тех. конф. студ., магистр., аспирант. . — 2014. — № . — С. 203-205.

22. Афанасьев, В. Н. Математическая теория конструирования систем управления / В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. — М. : Высш. шк., 1998. — 574 с.

23. Волгин, М. Е. Математические решения повышения эффективности распределительных сетей 6-10 КВ в системах электроснабжения промышленных предприятий / М. Е. Волгин, Е. М. Волгина, В. П. Марковский, Н. А. Дубинец // Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование : Международная научно-техническая конференция. Электронный сборник научных статей по материалам конференции в 3-х томах, Алматы, Казань, 20–21 октября 2022 года. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 204-214.

24. Котенев, В. И. Метод расчета сопротивлений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным и оценка его погрешности / В. И. Котенев, А. Д. Стулов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – Т. 29, № 3(71). – С. 98-110.

25. Котенев, А. В. Метод расчета сопротивлений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным / А. В. Котенев, Д. Н. Кузьмин, А. Д. Стулов // Вестник научных конференций. – 2023. – № 10-4(98). – С. 96-100.

26. Казаков, Ю. Б. Методика определения мощности потерь холостого хода трансформаторов с различным сроком службы / Ю. Б. Казаков, В. Я. Фролов, А. В. Коротков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2012. – № 1. – С. 20-24.

27. Пилюгин, Г. А. Методика оценки состояния синхронного двигателя при изменении управляющих воздействий / Г. А. Пилюгин, В. И. Пантелеев, А. Н. Филатов // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. – № 1(58). – С. 84-91.

28. АО «ЧЭАЗ». Микропроцессорные блоки релейной защиты и автоматики серии БЭМП РУ-ВВ. / Руководство по эксплуатации. БКЖИ.656316.004-03.01 РЭ. АО «ЧЭАЗ». 2023. 125 стр.

29. АО «ЧЭАЗ». Микропроцессорные блоки релейной защиты и автоматики серии БЭМП РУ-ЭД и БЭМП РУ-ЭД2. / Руководство по эксплуатации. БКЖИ.656316.004-04.01 РЭ. АО «ЧЭАЗ». 2024. 138 стр.

30. АО «ЧЭАЗ». Микропроцессорные блоки релейной защиты и автоматики серии БЭМП РУ-ОЛ и БЭМП РУ-ОЛ2. / Руководство по эксплуатации. БКЖИ.656316.004-01.01 РЭ. АО «ЧЭАЗ». 2023. 134 стр.

31. Котенев, В. И. Многосвязная автоматическая система с непрерывно-релейным управлением коэффициентом реактивной мощности узла нагрузки / В. И. Котенев, А. В. Котенев, С. А. Зангиев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции. В 2-х томах, Самара, 03–06 сентября 2019 года / Под редакцией С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. Том 1. – Самара: Общество с ограниченной ответственностью "Офорт", 2019. – С. 318-323.

32. Котенев, В. И. Моделирование системы автоматического управления напряжением системы электроснабжения с короткозамкнутыми асинхронными двигателями / В. И. Котенев, В. В. Кочетков, В. В. Петров // Актуальные проблемы энергетики АПК: VI Международная научно-практическая конференция, Саратов, 18–30 апреля 2015 года / Под общей редакцией Трушкина В.А.. – Саратов: ООО "Центр социальных агроинноваций СГАУ", 2015. – С. 126-127.

33. Гулиев, Г.Б. Нечеткий алгоритм управления потоками реактивной мощности в электрической сети с нелинейной характеристикой / Г.Б. Гулиев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и организаций стран СНГ. 2016. №4.

34. Пост. Правительства РФ от 27 декабря 2004 г № 861: принят Правительством РФ 27 декабря 2004 // Рос. газ. – 2005. – 19 января.

35. Приказ ФСТ РФ от 31.08.2010 N 219-э/6: принят ФСТ РФ 31.08.2010 // Рос. газ. – 2010. – 6 октября.
36. Приказ Департамента ценового и тарифного регулирования Самарской области от 28.11.2022 № 848.
37. Котенев, В. И. Обобщенная функциональная схема системы автоматического управления параметрами режима системы электроснабжения изменением реактивной мощности синхронного двигателя и статических компенсирующих устройств / В. И. Котенев, В. В. Кочетков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2014. – № 4(44). – С. 122-130.
38. Котенев, В. И. Обобщенная математическая модель узла нагрузки для управления параметрами режимов в системе электроснабжения / В. И. Котенев, В. С. Осипов, В. В. Кочетков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 103-106.
39. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 23.06.2015 № 380 // Оф. интернет-портал правовой информации, 27.07.2015
40. Мощинский, Ю. А. Определения схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю. А. Мощинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин // Электричество. 1998. № 4. С. 38-42.
41. Усольцев, А. А. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным / А. А. Усольцев, Д. В. Лукичев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 10. – С. 35-41.
42. Котенев, А. В. Определение сопротивлений короткозамкнутого асинхронного двигателя по каталожным данным / А. В. Котенев, В. И. Котенев, В. В. Кочетков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 1(49). – С. 103-109.
43. Котенев, В. И. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным

данным / В. И. Котенев, А. В. Котенев, В. В. Кочетков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 13-17.

44. Свит, П. П. Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей небольшой мощности / П. П. Свит, Б. В. Семкин // Ползуновский альманах. – 2004. – № 3. – С. 96-99.

45. Осипов, В. С. К определению параметров эквивалентной схемы замещения трехфазных асинхронных электродвигателей / В. С. Осипов // Электротехника. – 2017. – № 12. – С. 83-87.

46. Осипов, В. С. Определение параметров схем замещения трехфазных асинхронных электродвигателей / В. С. Осипов, В. И. Котенев, В. В. Кочетков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 3(39). – С. 175-184.

47. Зангиев, С. А. Определение сопротивлений синхронного двигателя по справочным данным / С. А. Зангиев // Молодежный научный форум: сборник статей по материалам ССХХV студенческой международной научно-практической конференции, Москва, 01 ноября 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Международный центр науки и образования", 2023. – С. 20-27.

48. Рысев, П. В. Определение оптимальной величины реактивной мощности синхронных двигателей узлов нагрузки распределительных сетей / П. В. Рысев, К. С. Шульга // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – № 2. – С. 149-155.

49. Оптовый рынок электроэнергии и мощности [Электронный ресурс]. URL: <https://br.so-ups.ru/> (дата обращения: 10.02.2024)

50. Шварц, Г. Р. Применение регулируемого электропривода в технологиях транспорта газа и нефти / Г. Р. Шварц, А. М. Абакумов, Л. А. Мигачева и др. — Книга 1-3. — М.: Машиностроение, 2008. — 240 с.

51. Абакумов, А. М. Применение современного электропривода переменного тока в технологиях газовой и нефтяной промышленности / А.

М. Абакумов, С. В. Алимов, В. Зипман и др. — М. : Машиностроение, 2009. — 240 с.

52. Хисматуллин, А. С. Применение нечеткой логики для компенсации реактивной мощности в электрической сети / А. С. Хисматуллин, И. В. Прахов, Е. С. Григорьев, Р. Р. Шафеев // Международный технико-экономический журнал. – 2018. – № 4. – С. 13-19.

53. Гончарук, А. Ю. Применение группового регулирования параметров синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности / А. Ю. Гончарук, П. В. Рысев, К. С. Шульга // Север России: стратегии и перспективы развития: материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Сургут, 27 мая 2016 года. Том 2. – Сургут: Сургутский государственный университет, 2016. – С. 176-181.

54. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. — М.-Л.: Энергия, 1967. — 456 с.

55. Котенев, А. В. Передаточная функция асинхронного двигателя как возмущающего воздействия на систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности / А. В. Котенев, А. Д. Стулов, Д. Н. Кузьмин и др. // Флагман науки. – 2024. – № 3(14). – С. 290-296.

56. Рысев, П. В. Перспективы систем централизованной компенсации реактивной мощности с групповым управлением синхронных электрических двигателей / П. В. Рысев, С. С. Мальков // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – С. 346-348.

57. ООО «ОВЕН». ПЛК 200 Программируемый логический контроллер. / Руководство по эксплуатации. 2022 – 55 стр.

58. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – Москва: ЭНАС, 2009. – 456 с.

59. Котенев, А. В. Построение математической модели ТП первого типа / А. В. Котенев, А. Д. Стулов, Д. Н. Кузьмин // Вестник научных конференций. – 2023. – № 9-3(97). – С. 50-52.

60. Ершов, С. В. Разработка системы адаптивного регулирования компенсации реактивной мощности / С. В. Ершов, В. Ю. Карницкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 8. – С. 32-39.
61. Юрганов, А. А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов / А. А. Юрганов, В. А. Кожевников. — СПб.: Наука, 1996. — 138 с.
62. Ботвинник, М. М. Регулирование возбуждения и статическая устойчивость инженерных машин / М. М. Ботвинник. — М.: Госэнергоиздат, 1950. — 59 с.
63. Регуляторы реактивной мощности ERN 11005/11007 / Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Серпухов. – 33 стр.
64. Слодарж, М. И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей / М. И. Слодарж. — М.: Энергия, 1977. — 216 с.
65. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников. — 4-е изд. переработ. и доп. . — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.
66. Гамазин, С. И. Самозапуск электрических двигателей / С. И. Гамазин. — М.: МЭИ, 1979. — 68 с.
67. Николаев, А. А. Сравнительный анализ режимов регулирования статического тиристорного компенсатора в системе электроснабжения дуговой сталеплавильной печи высокой мощности / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, В. В. Анохин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 35-46.
68. Нурматов, О. Е. Синхронные двигатели насосных станций как регуляторы нагрузки электрической системы / О. Е. Нурматов // Энергетические и электротехнические системы : международный сборник научных трудов. Том Выпуск 3. – Магнитогорск : Магнитогорский

государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2016. – С. 244-250.

69. Хисматуллин, А. С. Синтез нечеткого алгоритма компенсации реактивной мощности в электрической сети с нелинейной нагрузкой / А. С. Хисматуллин, Е. С. Григорьев // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 9. – С. 131-135.

70. Слежановский, О. В. Системы подчиненного регулирования электроприводов / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 256 с.

71. Груздев, И. А. Системы автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов / И. А. Груздев, О. М. Шахаева. — Л. : ЛПИ, 1978. — 79 с.

72. Михневич, Г. В. Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин / Г. В. Михневич. — М. : Наука, 1963. — 233 с.

73. Котенев, В. И. Система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения промышленного предприятия / В. И. Котенев, А. В. Котенев, А. Д. Стулов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – Т. 29, № 4(72). – С. 86-98.

74. АО «НИПОМ». Системы возбуждения синхронных машин. / Каталог. – Дзержинск: АО «НИПОМ». 2013 - 20 стр.

75. Котенев, В. И. Система автоматического регулирования реактивной мощности в узле нагрузки с управлением в функции параметров режима системы электроснабжения / В. И. Котенев, А. В. Котенев, С. А. Зангиев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : Труды XXI Международной конференции. В 2-х томах, Самара, 03–06 сентября 2019 года / Под редакцией С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. Том 1. – Самара: Общество с ограниченной ответственностью "Офорт", 2019. – С. 324-329.

76. Котенев, В. И. Система автоматического управления параметрами режима узла нагрузки с обратными связями по переменным синхронного двигателя / В. И. Котенев, А. В. Котенев, В. В. Кочетков, Д. А. Елькин // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 2. – С. 4-14.

77. Еремин, М. Ю. Снижение потерь реактивной мощности при работе асинхронных электродвигателей / М. Ю. Еремин, Н. В. Прибылова, И. И. Аксенов // Наука, образование и инновации в современном мире (НОИ-2019) : Материалы Национальной научной конференции Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I, Воронеж, 17–18 апреля 2019 года. Том Часть I. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2019. – С. 115-119.

78. Анчарова, Т. В. Справочник по энергоснабжению промышленных предприятий и общественных зданий / Т. В. Анчарова и др. ; под общ. ред.: С. И. Гамазина, Б. И. Кудрина, С. А. Цырука. – Москва: Изд. дом МЭИ, 2010..

79. Баумштейн, И. А. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / И. А. Баумштейн, М. В. Хомяков. — Под ред. Баумштейна И. А. и Хомякова М. В. — М.: Энергия, 1974. — 568 с.

80. Котенев В.И., Структурная схема синхронного электродвигателя без гибкой связи по углу нагрузки./ Котенев В.И., Котенев А.В., Кочетков В.В. // Состояние и перспективы развития электротехнологии. Тез. докл. Междунар. науч.-тех. конф. XVII Бенардосовские чтения, III том, электроэнергетика. – Иваново, 2013. – С 72-73.

81. Мирошник, И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы / И. В. Мирошник. — СПб.: Питер, 2005. — 306 с.

82. Матюхин, В. М. Уравнение и структурная схема синхронного генератора при автоматическом регулировании возбуждения / В. М. Матюхин. // Изв. АН СССР, ОТН. . — 1952. — № 9.

83. Котенев, В. И. Управление коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения в функции мощности потребителей и потерь в трансформаторах / В. И. Котенев, А. В. Котенев, А. Д. Стулов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 30, № 4(76). – С. 142-157.

84. Кочетков, В.В. Управление возбуждением синхронного двигателя на постоянство реактивной мощности узла нагрузки электрической системы. / Кочетков В.В. // Материалы докладов XX аспирантско–магистерского семинара, посвященного «Дню энергетика», т. 1 – Казань, 2016 – С. 28-3

85. Пантелеев, В. И. Управление режимами реактивной мощности и напряжения промышленного предприятия : монография / В. И. Пантелеев, А. Н. Филатов ; В. И. Пантелеев, А. Н. Филатов ; Краснояр. гос. техн. ун-т. – Красноярск: КГТУ, 2005. – 125 с.

86. Стулов, А. Д. Управление коэффициентом реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции / А. Д. Стулов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Двадцать девятой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 16–18 марта 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2023. – С. 1022.

87. Никифоров, В. О. Управление в условиях неопределённости: чувствительность, адаптация, робастность / В. О. Никифоров, А. В. Ушаков. — СПб.: ГИТМО (ТУ), 2002. — 232 с.

88. НПО «ПромЭлектроАвтоматика». Установки конденсаторные типа УКМ. / М.: НПО «ПромЭлектроАвтоматика». 2020 – 33 стр.

89. Грачева, Е. И. Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 1-2. – С. 53-63.

90. Меньшов, Б. Г. Электрооборудование нефтяной промышленности / Б. Г. Меньшов, И. И. Суд, А. В. Яризов. — М.: Недра, 1990. — 365 с.
91. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть станций и подстанций / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 608 с.
92. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в энергетических системах / С. А. Ульянов. — М. : Энергия, 1970. — 519 с.
93. Никитенко, Г. В. Электропривод производственных механизмов / Г. В. Никитенко. — 2-е, исправленное, дополненное. — Санкт-Петербург: Издательство Лань, 2013. — 224 с.
94. НПО «ЭлектроМаш». Электродвигатели асинхронные А4-400, 450. Руководство по эксплуатации. ЛЕУК.528111.001 РЭ. — Тирасполь.
95. Костенко, М. П. Электрические машины. Часть 2 / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. — Изд 3 перераб.,. — Л. : Энергия, 1973. — 648 с.
96. Андриевский, Б. Р. Элементы математического моделирования в программных средах MATLAB 5 и Scilab / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2001. — 286 с.
97. Липкин, Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Б. Ю. Липкин. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1990. — 366 с.
98. Стофт, С. Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии / С. Стофт ; Стивен Стофт ; пер. с англ. [С. С. Кавардаков и др.] под ред. А. И. Лазебника, И. С. Сорокина. — Москва : Мир, 2006. — 623 с. (В пер.)
99. Kotenev, A. V. A Power Supply System for an Industrial Facility with a Synchronous Electric Drive as a Reactive Power Factor Control Object / A. V. Kotenev, A. D. Stulov. // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). — Magnitogorsk : , 2023. — С. 177-181 — Англ.

100. K. Krishnaram A New Synchronous Detection Method (SDM) for Reactive Power Compensation and Power Factor Correction in Three-Phase Four-Wire Systems / K. Krishnaram, D. Kumar, R. Appavoo, I. Mahendrarvarman. // International Journal of Applied Engineering Research. — 2015. — № 10. — С. 394-398 – АНГЛ.
101. Yijun, Ma A review of reactive power optimization algorithm in power system / Ma Yijun. // Theoretical and Natural Science. — 2023. — № 5. — С. 886-891 – АНГЛ.
102. Rizvi, S,M A novel distance-based system reactive power index for system-level reactive power reserve assessment / S,M Rizvi. // IET Smart Grid. — 2022. — № 6. — С. 259-270 – АНГЛ.
103. Mei, X. A New Control Strategy of Hybrid Reactive Power Compensation System in Distribution Network / X. Mei, W. Yang, B. Sun. // Journal of Physics. — Dalian: , 2023. — С. 1-11 – АНГЛ.
104. Karimov, R. Analysis of reactive power consumption “Denav oil extraction plant” / R. Karimov, D. Xushvaktov. // E3S Web of Conferences. — Tashkent : Tashkent, University, 2023 – АНГЛ.
105. A. Pachghare Automatic Power Factor Compensation (APFC) For Industrial Power Use to Minimize Penalty / B. P. , A. Pachghare, A. Tumare [и др.]. // IET Smart GridJournal of Physics. — 2024 — № 11.
106. R. Patil, Automatic Power Factor Correction using Microcontroller / R. Patil, R. Warke, A. Rajbhar [и др.]. // 2020 International Conference for Emerging Technology (INCET. — 2020. С. 790-795 – АНГЛ.
107. Yagup, V. Analytical method of determining conditions for full compensation of reactive power in the power supply system / V. Yagup, Yagup, K.. // Electrical Engineering & Electromechanics. — 2024 – АНГЛ.
108. Farkhadov, Z. Automatic Control of Reactive Power in the Load Node of the Power Supply System Based on Fuzzy Logic / Z. Farkhadov, R. Azizov. // 1th International Conference on Theory and Application of Soft

Computing, Computing with Words and Perceptions and Artificial Intelligence - ICSCCW-2021: 2022. — С. 140-147 – АНГЛ.

109. Rechberger K. Analytical approach to calculate the transient state of doubly fed synchronous machines employing the steady state circle diagram of the machine. / Rechberger K., Coefler H. // 15th International Conference on Electrical Machines “ICEM 2002”. August 25 – 28. 2002. Brugge. Belgium. 2002 – АНГЛ.

110. W. Y. Fei, A Dynamic Reactive Power Compensation Method of Super High-Power and High-Voltage Motor / W. Y. Fei, Y. Y. Xin, J. Chen, C. Q. Jian. // Applied Mechanics and Materials (Volumes 602-605):. 2014. — С. 2828-2831 – АНГЛ.

111. Campaner Automatic voltage and reactive power control in distribution systems: Dynamic coupling analysis / Campaner, M. Chiandone, Sulligoi, and, F G. // 016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). — Birmingham: 2016. — С. 934-939. – АНГЛ.

112. Anderson, P. M. Analysis of Faulted Power Systems / P. M. Anderson: Wiley-IEEE Press, 1995. — 536 с.

113. Kotenev V. I., Automatic control system of load bus reactive factor/ Kotenev V. I., Elkin D. A., Osipov V. S. // Proceedings - 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018, Moscow, – АНГЛ.

114. Angayar, K. S. Comprehensive Overview of Modern Controllers for Synchronous Reluctance Motor / K. S. Angayar, K. Kumar, S. Arumugam // Journal of Electrical and Computer Engineering . — 2023. — № . — С. 1-14.– АНГЛ.

115. Arumugam, V. Embedded Control System for Reactive Power Control in Distributed Energy Resources for Voltage Regulation in the Distributed Power System / V. Arumugam, A. Kumar. // Serbian Journal of Electrical Engineering. — 2023. — № 20 (2023). — С. 107-126. – АНГЛ.

116. R. Wagle, Embedded Control System for Reactive Power Control in Distributed Energy Resources for Voltage Regulation in the Distributed Power System / R. Wagle, Le,N Pham, G. Tricarico [и др.]. // *Electr Eng* . — 2023. — № 106. — С. 2391–2405 – АНГЛ.

117. J. Li, Collaborative Control of Reactive Power and Voltage in a Coupled System Considering the Available Reactive Power Margin / J. Li, D. Guo, C. Liu [и др.]. // *Sustainability*. — 2024. — № 16. — С. 2627 – АНГЛ.

118. Kotenev, V. I. Controlling the Reactive Power Factor of a Combined Load Power Supply System and the Correction of Program as a Function of Current Power Consumption / V. I. Kotenev, A. V. Kotenev, A. D. Stulov. // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). — Chelyabinsk, Russia: IEEE, 2020. — С. 171-176 – АНГЛ.

119. Kotenev, V. I. . Controlling the Reactive Power of the Enterprise's Power Supply System with the Task Correction According to the Current Calculation Meter Readings / V. I. Kotenev, A. D. Stulov. // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). — Magnitogorsk, Russian Federation: IEEE, 2021. — С. 152-156 – АНГЛ.

120. Ye, K. C. Kosaraju Decentralized Reactive Power Control in Distribution Grids With Unknown Reactance Matrix / . Ye, K. C. Kosaraju, V. Gupta [и др.]. // *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. — 2024. — № 11. — С. 154-164 – АНГЛ.

121. M. Phatak, Design of Control Circuit Using PIC Microcontroller for Automatic Power Factor Correction. *International Journal of Advanced Research in Science* / S. M., M. Phatak, M. Kapase [и др.]. // *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*: 2022. — С. 689-695.8 – АНГЛ.

122. Vlasova, E. P. Development of a model of automatic regulation of reactive power compensation for the oil and gas industry / E. P. Vlasova, A. N. Botalov. // *Oil and Gas Studies*. — 219. — № 6. — С. 176-183.

123. R. Ma, Distributed reactive power control strategy based on adaptive virtual reactance / R. Ma, H. Fan, J. Li [и др.]. // IET Renewable Power Generation. — 2022. — № 17(1). — С. 762-773 – АНГЛ.
124. Jin Z., Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive./ Jin Z., Bose B.K. // IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02. 2002. 229-234 vol.1 – АНГЛ.
125. Kotenev A.V. Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability / Kotenev A.V., Kotenev V.I, Kochetkov V.V., Elkin D.A. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. №1.012064 – АНГЛ.
126. Zhu, Y.Hierarchical Control Method of AVC Reactive Power and Voltage in 110 kV Substation Based on Two-Level Reactive Power Optimization / Zhu, Y., Lin [и др.]. // Yadav, S., Arya, Y., Muhamad, N.A., Sebaa, K. (eds) Energy Power and Automation Engineering. ICEPAE 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering. — Singapore: Springer, 2024 – АНГЛ.
127. Yu, H. Low Voltage Ride Through Control Strategy for VSG Based on Power Angle and Current Regulation / Yu, H., Fu [и др.]. // ai, C., Qu, X., Mai, R., Zhang, P., Chai, W., Wu, S. (eds) The Proceedings of 2023 International Conference on Wireless Power Transfer (ICWPT2023). ICWPT 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1161. — Singapore: Springer, 2024 – АНГЛ.
128. S. Goolak, Hybrid Reactive Power Compensator with Adaptation of the Operation of the Control System to the Parameters of the Mains Voltage / S. Goolak, M. Kyrychenko, V. Tkachenko, S. Kozlov. // Problems of the Regional Energetics. — 2023. — № 5. — С. 1-16 – АНГЛ.
129. Köppe, H. Improving Power System Efficiency: A Case Study on Optimized Reactive Power Management in High-Voltage / H. Köppe, M. Schuster, B. Engel. // Energies. — 2022. — № 15 – АНГЛ.
130. Bolovin, E. Improving Power System Efficiency: A Case Study on Optimized Reactive Power Management in High-Voltage Grids / E. Bolovin, A. Glazyrin, V. Polichshuk. // Energies. — 2022. — № 15 – АНГЛ.

131. Popa, G. Low-Cost System with Transient Reduction for Automatic Power Factor Controller in Three-Phase Low-Voltage Installations / G. Popa, C. Dinis. // *Energies*. — 2024. — № 17 – АНГЛ.
132. Dorf, R. C. Modern Control Systems / R. C. Dorf, R. H. Bishop. — 12th Edition: Pearson, 2010. — 1085 с – АНГЛ.
133. A. Khabdullin, Mathematical model of synchronous motors for static characteristics power loss / A. Khabdullin, A. Khabdullin, Z. Khabdullina, G. Khabdullina. // *Energy Procedia*. — 2016. — № 95. — С. 487-490 АНГЛ.
134. Kafi, Z. Microcontroller-based automatic power factor correction for three- phase loads / Z. Kafi. //— 2023 – АНГЛ.
135. Jin, Z, Bose, B Neural-network-based waveform Processing and Delayless filtering in power electronics and AC drives / Z, Bose, B Jin. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2004. — № 5. — С. 981-991 – АНГЛ.
136. A. C. Megherbi, Neural-network-based waveform Processing and Delayless filtering in power electronics and AC drives / A. C. Megherbi, H. Megherbi, K. Benmahamed [и др.]. // *Journal of Electrical Engineering & Technology* . — 2010. — № 4. — С. 597-605 – АНГЛ.
137. Lakra, N. S. Power quality improvement of distribution system by reactive power compensation / N. S. Lakra, P. Prakash, R. C. Jha. // 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC). — Chennai, India : IEEE Xplore, 2017. — С. 415-420 – АНГЛ.
138. Yu Research on Reactive Power Optimization Control of Distribution Network with Distributed Generation Based on Genetic Algorithm / Yu, C.. // 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC). — Singapore : Springer, 2024 – АНГЛ.
139. Saxena N., Reactive Power Procurement as Ancillary Service for Dispersed Electric Vehicles in Radial Distribution System / N. Saxena, D. Rajput, A. Srivastava [и др.]. // Kumar, A., Singh, S.N., Kumar, P. (eds) *Decarbonisation and Digitization of the Energy System. SGESC 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 1099. — Singapore: Springer, 2024. – АНГЛ.

140. Saxena N., Reactive Power Procurement as Ancillary Service for Dispersed Electric Vehicles in Radial Distribution System / N. Saxena, D. Rajput, A. Srivastava [и др.]. // Kumar, A., Singh, S.N., Kumar, P. (eds) Decarbonisation and Digitization of the Energy System. SGESC 2023. — Singapore : Springer, 2024. — АНГЛ.

141. L. Chen, Reactive power control of hybrid systems using improved coyote optimizer / L. Chen, X. Yi, Y. Zhou [и др.]. // Concurrency and Computation: Practice and Experience: Wiley, 2023— АНГЛ.

142. J. Huang Reactive power optimization system of distribution network based on edge calculation / J. Huang, J. Fang, L. Hu [и др.]. // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — № 1914 — АНГЛ.

143. Ocoleanu D. C., Reactive Energy Transfer Reduction Equipment for Low-Load Wound-Rotor Induction Motors / D. C. Ocoleanu, C. -. Salceanu, M. Ionescu [и др.]. // 2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN). — Iasi, Romania: IEEE Xplore, 2021. — С. 186-191. — АНГЛ.

144. Ocoleanu D. C., Reactive Energy Compensation Equipment Used in High Power Laboratories / D. C. Ocoleanu, C. -. Salceanu, M. Ionescu [и др.].// Annals of the University of Craiova Electrical Engineering Series. — 2022. — № 46. — С. 49 — АНГЛ.

145. Q. J. Cheng, Research on a dynamic reactive power compensation method of composite power load / Q. J. Cheng, J. Chen, Y. X. Yuan [и др.] // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — № 602-605. — С. 2840-2843 — АНГЛ.

146. Joshi, B. S. Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system / B. S. Joshi, O. P. Mahela, S. R. Ola // 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE). — Jaipur, India: IEEE Xplore, 2016. — С. 1-5 — АНГЛ.

147. X. Zhou, Reactive power compensation in motor / X. Zhou, Y. Ma, Z. Gao, S. Zhang. // 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). — Takamatsu, Japan: IEEE Xplore, 2017. — С. 295-299 – АНГЛ.
148. Kotenev V. I., Synchronous motor start-up operation modeling in event of load bus reactive power control / Kotenev V. I., Kotenev A. V., Elkin D. A. // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019, Sochi – АНГЛ.
149. Lambe, S. election of Reactive Load to Correct Power Factor, Cost-Effectiveness / S. Lambe, K. Karande // Gunjan, V.K., Kumar, A., Zurada, J.M., Singh, S.N. (eds) Computational Intelligence in Machine Learning. ICCIML 2022. — Singapore: Springer, 2024 – АНГЛ.
150. Zhou, Yu Study on leveraging wind farms' robust reactive power range for uncertain power system reactive power optimization / Yu Zhou, Z. Li, G. Wang. // Applied Energy: Elsevier, 2021 – АНГЛ.
151. L. Hongbo, Study on reactive power optimal control of distribution systems based on hybrid control theory / L. Hongbo, G. Biping, Z. Wangjun [и др.]. // CIED 2010 Proceedings. — Nanjing, China: IEEE Xplore, 2010. — С. 1-6 – АНГЛ.
152. Kotenev, V. I. The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply / V. I. Kotenev, V. V. Kochetkov, D. A. Elkin. // 017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). — Astana, Kazakhstan: IEEE Xplore, 2017. — С. 1-4 – АНГЛ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ АО «ГК «ЭЛЕКТРОЩИТ» - ТМ САМАРА»

Утверждаю

Директор департамента управления качеством _____ Аксенов Д.М.

« 31 » Мая 2024г.

АКТ

внедрения в практику приемосдаточных испытаний АО «ГК «Электрощит» - ТМ Самара» методики расчета сопротивлений, пусковых характеристик асинхронных двигателей и методики настройки регуляторов синхронного двигателя

Комиссия в составе:

председатель: директор департамента управления качеством Аксенов Д.М.

члены комиссии: начальник отдела технического контроля Гусев Д.Г.,

начальник участка испытаний Ланкин А.Ю.

составили настоящий акт о том, что для АО «ГК «Электрощит» - ТМ Самара» разработаны:

- методика расчета сопротивлений и пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором – использована для испытаний микропроцессорных терминалов релейных защит электродвигателей;

- методика расчета и настройки регуляторов систем управления возбуждением синхронных двигателей – использована для испытаний функционирования релейных защит синхронных двигателей;

разработанные авторским коллективом Самарского государственного технического университета в составе: Стулов А.Д., под руководством доцента Котенева А.В.

Комиссия постановила:

рекомендовать к внедрению систему управления возбуждением синхронного двигателя на постоянство коэффициента реактивной мощности узла нагрузки в функции реактивной мощности пускаемых в ход асинхронных двигателей.

Директор департамента
управления качеством

Начальник отдела
технического контроля

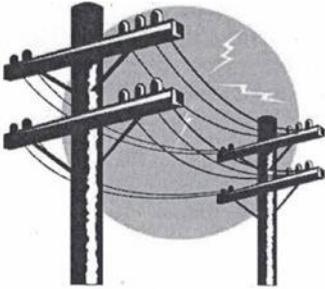
Начальник участка
испытаний

Аксенов Д.М.

Гусев Д.Г.

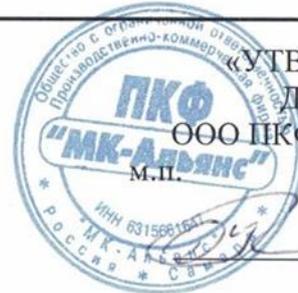
Ланкин А.Ю.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО ПКФ «МК-АЛЬЯНС»



ООО ПКФ «МК-Альянс»

ИНН 6315661647 ОГРН 1146315007222
Юр. адрес: 443010, г. Самара, ул. Рабочая д. 15, оф.
211А
Тел.: 8(846)-230-09-57
E-mail: mk-alians59@mail.ru



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
ООО ПКФ «МК-Альянс»
М.П.

Кекелия Д.А.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Стулова Александра Дмитриевича
«Повышение эффективности управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения предприятия с нелинейным синхронным электроприводом»

Комиссия в составе:

- председатель комиссии: Директор ООО ПКФ «МК-Альянс» Кекелия Д.А.
- члены комиссии: Заместитель директора по строительству ООО ПКФ «МК-Альянс»
Мачавариани С.У., Главный инженер ООО ПКФ «МК-Альянс» Кочетков В.В.

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы А.Д. Стулова, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в работе по проектированию и строительству объектов энергетики в рамках работ по реконструкции и повышению надежности сетей электроснабжения, трансформаторных подстанций и распределительных пунктов в г. Самара и Самарской области.

Комиссией решено рекомендовать к внедрению предложенные А.Д. Стуловым структуры систем управления коэффициентом реактивной мощности, в частности двухконтурную систему подчиненного регулирования коэффициента реактивной мощности системы электроснабжения.

Директор
ООО ПКФ «МК-Альянс»

Кекелия Д.А.

Заместитель директора по строительству
ООО ПКФ «МК-Альянс»

Мачавариани С.У.

Главный инженер
ООО ПКФ «МК-Альянс»

Кочетков В.В.

