

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Электроэнергетики

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В. И. Пантелеев

подпись инициалы, фамилия

« _____ » декабря 2023 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Автоматическая стабилизация коэффициента мощности участка электрической
сети при использовании синхронных машин

тема

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код и наименование направления

13.04.02.09 «Автоматизация энергетических систем»

код и наименование магистерской программы

Руководитель

подпись, дата

доц. каф ЭМиАТ, к.т.н

должность, ученая степень

А. В. Коловский

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

В.Ю. Кузьменко

инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

проф. ЦТид ХГУ, д.т.н.

должность, ученая степень

А.С. Дулесов

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

доц. каф ЭМиАТ, к.т.н

должность, ученая степень

А. В. Коловский

инициалы, фамилия

Абакан 2023

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт

«Электроэнергетика»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Г. Н.

Чистяков

подпись инициалы, фамилия

« 15 » октября 2021 г

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Абакан 2021

Студенту Кузьменко Владимиру Юрьевичу

фамилия, имя, отчество

Группа ОЗХЭН 21-01 Направление (специальность) 13.04.02

номер

код

«Электроэнергетика и электротехника»

полное наименование

Тема выпускной квалификационной работы Автоматическая стабилизация коэффициента мощности участка электрической сети при использовании синхронных машин

Утверждена приказом по университету № 710 от 12.10.2021

Руководитель ВКР Коловский А.В., доцент, к.т.н.

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР. Схема узла электроснабжения с синхронными двигателями, параметры двигателей

Перечень разделов ВКР

1 Теоретическая часть

1.1 Актуальность повышения коэффициента мощности в системе электроснабжения и нормативные значения в сетях

1.2 Применение синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности

1.3 Обзор систем автоматического регулятора возбуждения синхронных компенсаторов и синхронных двигателей

1.4 Средства моделирования синхронных машин как элемент электроэнергетической системы

2 Моделирование участка электрической сети

2.1 Математическое описание синхронных машин

2.2 Описание системы с помощью уравнений Парка-Горева

2.3 Упрощение модели синхронных машин

2.4 Моделирование синхронного двигателя и компенсирование в SimInTech

2.5 Модель системы APB в SimInTech

2.6 Моделирование участка электрической сети в SimInTech

3 Стабилизация коэффициента мощности

3.1 Постановка задачи

3.2 Компенсация инерционности объекта в контуре регулирования

3.3 Моделирование участка электрической сети с регулированием синхронных машин

Руководитель ВКР

подпись

А. В. Коловский

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

В. Ю. Кузьменко

подпись, инициалы и фамилия студента

« ___ » _____ 2021 г.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Оптимизация потоков реактивной мощности на участке электрической сети» содержит 59 страниц текстового документа, 26 использованных источников, 31 рисунок, 0 приложений.

СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ, КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ, АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Объект исследования – синхронные двигатели.

Предмет исследования – система компенсации реактивной мощности с помощью группы синхронных двигателей.

В теоретической части работы рассмотрена актуальность задачи повышения коэффициента мощности в системе электроснабжения, её нормативные значения в сетях. Также рассматривается применение синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности, даётся обзор систем АРВ, СК и СД.

Во второй главе предлагается математическое описание синхронной машины, в том числе и с помощью системы уравнение Парка-Горева, на основе выбранных допущений даётся упрощённое математическое описание, подходящее для задачи компьютерного моделирования в среде SimInTech. Далее демонстрируется полученная компьютерная модель индивидуального двигателя, а также общей системы электроснабжения.

В третьей главе решается задача стабилизации коэффициента мощности на участке электрической сети. В рамках главы даётся формальная постановка задачи, разрабатывается регулятор. На полученных результатах разрабатывается компенсация инерционности объекта в контуре регулирования. Далее разрабатывается модель регулирования группы синхронных машин и предлагается компьютерная модель системы компенсации реактивной мощности на основе закона регулирования группы синхронных машин.

THEABSTRACT

The master's thesis on the topic “Optimization of reactive power flows in an electrical network section” contains 59 pages of text document, 26 used sources, 31 drawings, 0 appendices.

SYNCHRONOUS MOTORS, REACTIVE POWER COMPENSATION, ELECTRICAL POWER SYSTEMS, EXCITATION CURRENT CONTROL, AUTOMATIC CONTROL, COMPUTER SIMULATION.

The object of study is synchronous motors.

The subject of the study is a reactive power compensation system using a group of synchronous motors.

The theoretical part of the work examines the relevance of the problem of increasing the power factor in the power supply system and its standard values in networks. The use of synchronous motors for reactive power compensation is also considered, and an overview of ARV, SC and SD systems is given.

The second chapter proposes a mathematical description of a synchronous machine, including using the Park-Gorev equation system; based on the selected assumptions, a simplified mathematical description is given that is suitable for the problem of computer modeling in the SimInTech environment. Next, the resulting computer model of an individual engine, as well as the overall power supply system, is demonstrated.

The third chapter solves the problem of stabilizing the power factor in a section of the electrical network. Within the framework of the chapter, a formal statement of the problem is given and a regulator is developed. Based on the results obtained, compensation for the inertia of the object in the control loop is developed. Next, a model for regulating a group of synchronous machines is developed and a computer model of a reactive power compensation system is proposed based on the law for regulating a group of synchronous machines.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Теоретическая часть.....	7
1.1 Актуальность повышения коэффициента мощности в системе электроснабжения и нормативные значения в сетях.....	7
1.2 Применение синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности.....	9
1.3 Обзор систем автоматического регулятора возбуждения синхронных компенсаторов и синхронных двигателей.....	10
1.3.1 Синхронные компенсаторы	10
1.3.2 Синхронные двигатели.....	12
1.3.3 Автоматический регулятор возбуждения.....	13
1.4 Средства моделирования синхронных машин как элемент электроэнергетической системы.....	15
1.4.1 Rastrwin3	15
1.4.2 SimInTech.....	17
1.4.3 Matlab	19
2 Моделирование участка электрической сети.....	21
2.1 Математическое описание синхронных машин.....	21
2.2 Описание системы с помощью уравнений Парка-Горева	25
2.2.1 Уравнения Парка — Горева для синхронной машины в операторной форме	27
2.3 Упрощение модели синхронных машин	29
2.4 Моделирование синхронного двигателя и компенсирование в SimInTech	32
2.5 Модель системы APB в SimInTech.....	38
2.6 Моделирование участка электрической сети в SimInTech	40
3 Стабилизация коэффициента мощности.....	43
3.1 Постановка задачи.....	43
3.2 Компенсация инерционности объекта в контуре регулирования.....	45
3.3 Моделирование участка электрической сети с регулированием синхронных машин	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	58

ВВЕДЕНИЕ

Система стабилизации коэффициента мощности электрической сети является важным компонентом при использовании синхронных двигателей. Она предназначена для поддержания стабильного и оптимального значения коэффициента мощности сети.

Синхронные двигатели использовались широко в промышленности, так как они обеспечивают эффективную передачу и преобразование электрической энергии. Однако, при работе синхронных двигателей возникает проблема реактивной мощности, которая влияет на эффективность работы электрической сети.

Коэффициент мощности является показателем соотношения активной и реактивной мощностей в электрической сети. Оптимальным значением коэффициента мощности является 1, что означает, что вся мощность в сети является активной и используется для выполнения работы. Однако, при использовании синхронных двигателей коэффициент мощности может быть менее 1, из-за наличия реактивной мощности.

Система стабилизации коэффициента мощности решает эту проблему путем подключения компенсационных устройств, таких как синхронные двигатели, к электрической сети. Двигатели компенсируют реактивную мощность, увеличивая ее значение и тем самым повышая коэффициент мощности сети.

Такая система позволяет эффективно управлять коэффициентом мощности, поддерживая его на оптимальном уровне. Оптимальный коэффициент мощности не только позволяет улучшить эффективность работы синхронных двигателей, но и снижает потери энергии в электрической сети.

Система стабилизации коэффициента мощности имеет множество преимуществ. Она повышает эффективность использования электроэнергии, снижает нагрузку на электрическую сеть, улучшает надежность работы оборудования и уменьшает потери энергии. Кроме того, она помогает сократить негативное влияние на окружающую среду, так как снижает потребление электроэнергии.

Система стабилизации коэффициента мощности электрической сети при использовании синхронных двигателей является важным инструментом для оптимизации работы электрических систем. Она позволяет поддерживать стабильный и оптимальный коэффициент мощности, что способствует повышению эффективности использования электроэнергии и снижению негативного влияния на окружающую среду.

1 Теоретическая часть

1.1 Актуальность повышения коэффициента мощности в системе электроснабжения и нормативные значения в сетях

Актуальность повышения коэффициента мощности в системе электроснабжения является одной из ключевых задач для энергетических компаний и промышленных предприятий. Коэффициент мощности показывает, насколько эффективно электрическая энергия используется в системе, и определяет соотношение между активной и реактивной мощностью.

Реактивная мощность возникает из-за индуктивности и емкости электрических устройств, таких как двигатели, трансформаторы и конденсаторы. Она не выполняет полезную работу, но требует дополнительной энергии для поддержания магнитных полей и зарядов в устройствах. Когда реактивная мощность высока, коэффициент мощности снижается, что приводит к непроизводительному использованию энергии и увеличению нагрузки на электросеть.

Снижение коэффициента мощности может иметь несколько негативных последствий. Во-первых, это приводит к потере энергии в сетях, которая возникает из-за ненужной реактивной мощности. Это влечет за собой дополнительные затраты для компаний и предприятий. Кроме того, снижение коэффициента мощности приводит к увеличению нагрузки на электросеть, что может вызвать перегрузку и снижение надежности работы системы электроснабжения [2, 7-9, 11-13].

Нормативные значения коэффициента мощности в сетях зависят от местных энергетических норм и стандартов. Обычно оптимальное значение коэффициента мощности составляет 0.95 и выше. Значения ниже этого значения считаются недопустимыми и могут привести к штрафам и дополнительным затратам для потребителей электроэнергии и энергетических компаний.

Для повышения коэффициента мощности в системе электроснабжения применяются различные методы и технологии. Одним из них является использование компенсационных устройств, таких как конденсаторы. Конденсаторы компенсируют реактивную мощность, увеличивая активную мощность и тем самым повышая коэффициент мощности.

Также важным методом является оптимизация работы оборудования и применение энергосберегающих технологий. Это может включать в себя использование эффективных двигателей с высоким коэффициентом мощности, регулирование нагрузки, установку интеллектуальных систем управления и мониторинга энергопотребления.

Повышение коэффициента мощности в системе электроснабжения имеет множество преимуществ. Во-первых, это позволяет более эффективно использовать электрическую энергию, что приводит к снижению затрат и

улучшению экономической эффективности. Кроме того, повышение коэффициента мощности улучшает надежность работы системы электроснабжения, предотвращает перегрузку сети и улучшает качество электрической энергии.

Повышение коэффициента мощности является актуальной задачей для энергетических компаний и промышленных предприятий. Оптимальный коэффициент мощности не только повышает эффективность использования электроэнергии, но и снижает нагрузку на электросеть и улучшает надежность работы электрических систем. Внедрение соответствующих технологий и методов позволяет достичь оптимального значения коэффициента мощности и добиться качественного энергоснабжения.

Государственное регулирование коэффициента мощности в электрической сети является одной из важных задач энергетической политики каждого государства. Коэффициент мощности отражает соотношение между реактивной и активной мощностью в электрической системе.

Государственное регулирование коэффициента мощности направлено на снижение потерь энергии в электрической сети и повышение ее эффективности. Оно осуществляется путем введения нормативов для коэффициента мощности, которые потребители электроэнергии обязаны соблюдать. В случае несоблюдения этих нормативов, потребители могут быть подвергнуты штрафам или ограничениям в предоставлении услуг электроснабжения.

Государственное регулирование также включает в себя обязательную установку оборудования, такого как компенсационные устройства, для улучшения коэффициента мощности в электрической сети. Это позволяет снизить нагрузку на электрическую систему, снизить потери энергии и улучшить качество электроснабжения[11-13].

Итак, государственное регулирование коэффициента мощности в электрической сети является неотъемлемой частью энергетической политики каждого государства. Оно направлено на повышение эффективности энергопотребления и улучшение качества электроснабжения, что является важным фактором для устойчивого развития энергетики и экономики в целом.

Текущие значения, установленные нормативом Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380 "О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии":

Сети напряжением 110 кВ (154 кВ)	0,5
Сети напряжением 35 кВ (60 кВ)	0,4
Сети напряжением 6 - 20 кВ	0,4
Сети напряжением 0,4 кВ	0,35

1.2 Применение синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности

Синхронные двигатели могут быть использованы для компенсации реактивной мощности в электрических системах. Реактивная мощность является частью полной мощности, которая создается в результате работы индуктивных нагрузок, таких как трансформаторы, моторы и индуктивные нагрузки. Когда в системе присутствует большой объем реактивной мощности, это может привести к таким негативным явлениям, как потери энергии, снижение эффективности системы и перегрузка оборудования.

Синхронные двигатели обладают рядом преимуществ и недостатков, которые следует учитывать при их применении. Одним из главных преимуществ синхронных двигателей является их высокий коэффициент мощности, что делает их идеальным выбором для компенсации реактивной мощности в электрических системах. Также синхронные двигатели обладают стабильной скоростью вращения, что делает их подходящими для применения в системах, требующих постоянной скорости вращения, например, в генераторах или водозаборных насосах. Кроме того, синхронные двигатели отличаются высокой эффективностью и могут иметь компактный размер, что делает их удобными для размещения в ограниченных пространствах.

Среди недостатков синхронных двигателей можно выделить их высокую стоимость и сложность управления. В ходе работы синхронные двигатели требуют постоянного поддержания постоянного внешнего источника возбуждения для поддержания синхронной скорости вращения, что может увеличить себестоимость и уровень сложности системы. Еще одним недостатком является то, что синхронные двигатели могут иметь низкую пусковую мощность, что может усложнять их применение в отдельных случаях, таких как пуск больших инертных нагрузок[7-9].

Однако несмотря на некоторые недостатки, синхронные двигатели остаются одними из наиболее эффективных и универсальных вариантов для многих промышленных и коммерческих приложений, благодаря их высокой точности управления, высокой эффективности и способности компенсировать реактивную мощность.

Синхронные двигатели могут работать в нескольких режимах в зависимости от их применения и особенностей системы. Одним из основных режимов работы синхронных двигателей является режим с неподвижным возбуждением. В этом режиме синхронный двигатель работает как генератор под постоянной нагрузкой, обеспечивая стабильную выходную мощность. Этот режим обычно используется в генераторах, водозаборных насосах и других приложениях, которым требуется постоянная выходная мощность.

Другим распространенным режимом работы синхронных двигателей является режим с регулируемым возбуждением. В этом режиме синхронный двигатель может контролировать реактивную мощность и выдавать ее в соответствии с потребностями системы. Этот режим применяется для компенсации реактивной мощности, управления напряжением и поддержания

стабильности системы.

Также синхронные двигатели могут работать в качестве пускового или генераторного двигателя в системе электропривода для механизмов с постоянной скоростью или в качестве синхронного компенсатора мощности. Кроме того, существуют специальные режимы работы синхронных двигателей, например, режимы синхронного запуска и синхронного торможения, которые могут использоваться в специфических приложениях, таких как электрическиетяговые системы.

Таким образом, синхронные двигатели имеют различные режимы работы, которые позволяют им адаптироваться к различным условиям и потребностям электрических систем.

Одним из способов компенсации реактивной мощности является использование синхронных двигателей. Эти двигатели имеют способность генерировать реактивную мощность в том же направлении, что и реактивная мощность нагрузки, что может помочь снизить уровень реактивной мощности в системе. При этом синхронные двигатели могут работать в режиме с генерацией реактивной мощности или же быть подключены к сети и работать в режиме компенсации[2, 7-9, 11-13].

Предприятия, оперирующие с большими индуктивными нагрузками, могут использовать синхронные двигатели для компенсации реактивной мощности с целью повышения эффективности и экономии энергии. При этом следует подбирать синхронные двигатели с учетом специфики нагрузки и особенностей работы системы, чтобы обеспечить оптимальную компенсацию реактивной мощности.

Таким образом, применение синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности может способствовать повышению эффективности электрических систем и уменьшению потерь энергии, что является важным аспектом в современной энергетике.

1.3 Обзор систем автоматического регулятора возбуждения синхронных компенсаторов и синхронных двигателей

1.3.1 Синхронные компенсаторы

Синхронные компенсаторы мощности – это устройства, которые используют синхронные двигатели для компенсации реактивной мощности в электрических сетях. Они работают путем генерации реактивной мощности, которая компенсирует реактивное потребление энергии в системе, улучшая таким образом коэффициент мощности и эффективность использования электроэнергии.

Основным компонентом синхронного компенсатора является синхронный двигатель, который работает в режиме генератора реактивной мощности. Подключенные к системе управления, синхронные компенсаторы могут включаться и регулироваться для генерации реактивной мощности в соответствии с потребностями сети. Это позволяет им динамически

компенсировать изменения реактивной мощности и обеспечивать стабильный коэффициент мощности.

Синхронные компенсаторы являются превосходным решением для улучшения энергоэффективности и предотвращения негативных эффектов, связанных с низким коэффициентом мощности в электрических сетях. Они помогают избежать штрафов за некорректный коэффициент мощности, улучшают стабильность напряжения и уменьшают потери энергии в системе.

Однако, важно отметить, что установка и настройка синхронных компенсаторов требует профессионального подхода и должна проводиться в соответствии с требованиями и характеристиками конкретной электрической сети. Кроме того, необходимо обеспечить регулярное техническое обслуживание и мониторинг, чтобы гарантировать их надежную и эффективную работу в течение всего срока эксплуатации.

Таким образом, синхронные компенсаторы мощности представляют собой важное средство для улучшения коэффициента мощности, повышения эффективности использования электроэнергии и поддержания стабильности электрических сетей[11-13].

СК могут работать как в режиме генерации реактивной мощности, так и в режиме ее потребления.

Режим работы СК определяется величиной подаваемого в обмотку ротора тока возбуждения. При перевозбуждении СК работает как источник реактивной мощности и выдает ее в сеть. При недо возбуждении СК потребляет реактивную мощность из сети.

Схема замещения СК и соответствующие ей векторные диаграммы показаны на рис. 1.

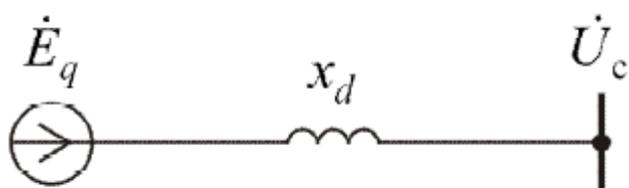


Рисунок 1 – Схема замещение СК

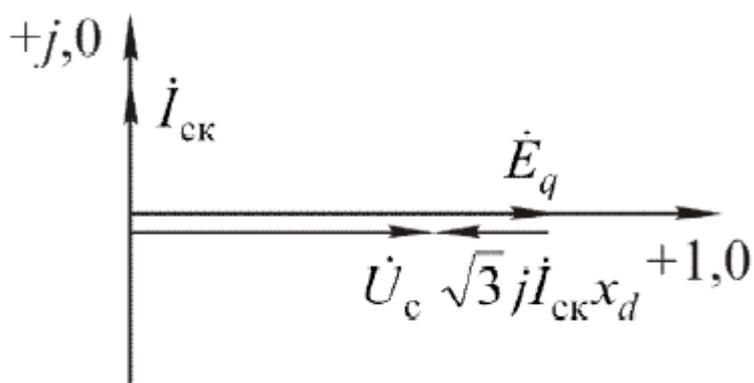


Рисунок 2 – СК в режиме перевозбуждения

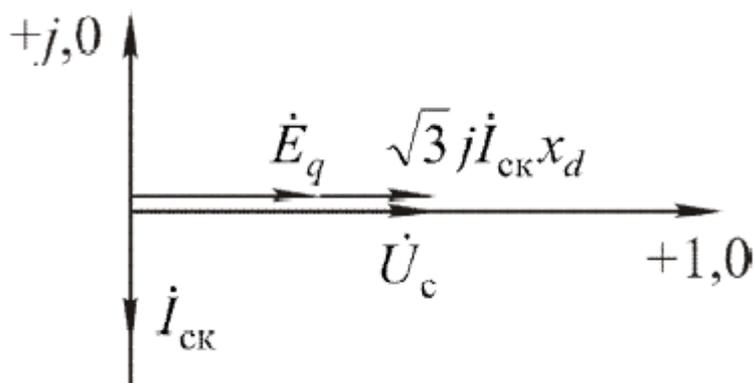


Рисунок 3 – СК в режиме недовозбуждения

Достоинствами СК являются:

- положительный регулирующий эффект, который заключается в том, что при уменьшении напряжения в сети генерируемая мощность компенсатора увеличивается;
- возможность плавного и автоматического регулирования реактивной мощности;
- широкий диапазон регулирования;
- достаточная термическая и электродинамическая стойкость обмоток СК при коротких замыканиях;
- возможность восстановления поврежденных СК путем проведения ремонтных работ.

К недостаткам СК относятся:

- высокая стоимость;
- усложнение эксплуатации (по сравнению с БК);
- высокие эксплуатационные расходы;
- значительные потери реактивной мощности (10–30 Вт/кВАр);
- значительный шум во время работы.

1.3.2 Синхронные двигатели

Синхронные двигатели (СД), установленные на промышленных предприятиях, могут быть использованы как источники реактивной мощности. СД, в основном, изготавливаются номинально опережающим $\cos\varphi = 0,9$ и могут являться достаточно эффективным средством компенсации реактивной мощности.

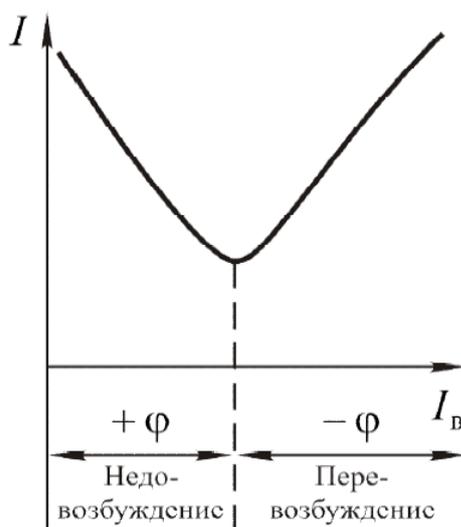


Рисунок 4 – Характеристика синхронного двигателя

Левая ветвь характеристики соответствует режиму недо возбуждения СД. В этом режиме СД, как и синхронный двигатель, потребляет из сети реактивную мощность.

Правая ветвь характеристики соответствует режиму перевозбуждения СД. В этом режиме СД работает не только как двигатель, но и как источник реактивной мощности, т. е. выдает реактивную мощность в сеть. Минимальное значение тока статора имеет место при $\cos\varphi = 1$.

Наибольший верхний предел возбуждения СД определяется допустимой температурой обмотки ротора с выдержкой, достаточной для форсировки возбуждения при кратковременном снижении напряжения.

Величина генерируемой СД реактивной мощности зависит от загрузки двигателя активной мощностью, напряжения на его зажимах технических данных двигателя.

Основным критерием для выбора рационального режима возбуждения СД, являются дополнительные удельные потери активной мощности на генерацию реактивной мощности.

Удельные потери активной мощности на генерацию реактивной мощности существенно зависят от номинальной мощности и частоты вращения СД и могут достигать от 10 до 50 Вт/кВАр. С уменьшением номинальной мощности и частоты вращения СД величины удельных потерь значительно возрастают [2].

1.3.3 Автоматический регулятор возбуждения

Автоматическое регулирование возбуждения у синхронных двигателей является важным аспектом их работы. Синхронные двигатели широко используются в промышленности, электростанциях и других отраслях из-за своих высоких эффективности и надежности.

Возбуждение синхронного двигателя отвечает за создание магнитного

поля внутри статора, что позволяет двигателю генерировать вращательное движение. Оптимальное возбуждение обеспечивает стабильность работы двигателя и его эффективность. Однако факторы, такие как изменение нагрузки, напряжения питания или другие изменения в сети, могут требовать регулирования возбуждения.

Регулирование возбуждения синхронных двигателей является важным аспектом для компенсации реактивной мощности в электрических системах. Реактивная мощность является основным компонентом, потребляемым синхронными двигателями, и неэффективное управление ею может привести к нежелательным последствиям в системе, таким как перегрузка оборудования, потери энергии и дополнительные затраты.

Возбуждение синхронного двигателя контролирует его реактивную мощность. Если возбуждение недостаточно, двигатель будет потреблять больше реактивной мощности и нарушит баланс активной и реактивной мощности в системе. Это приведет к ненужному росту нагрузки на систему и повышенным затратам на электроэнергию.

С другой стороны, если возбуждение синхронного двигателя слишком высокое, это может привести к потере энергии и перегрузке системы. Излишняя реактивная мощность также может вызывать проблемы в системе (например, повышенное теплообразование), что ухудшит эффективность и надежность работы.

Компенсация реактивной мощности осуществляется путем регулирования возбуждения синхронных двигателей. Это может быть достигнуто с помощью использования автоматических регуляторов возбуждения или контроллеров, которые обеспечивают оптимальное управление реактивной мощностью и поддержание баланса в системе.

Правильное управление реактивной мощностью имеет ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет снизить затраты на электроэнергию, поскольку компенсация реактивной мощности снижает потребление реактивной энергии. Во-вторых, это улучшает эффективность системы, снижая потери энергии и перегрузку оборудования. И, наконец, это повышает надежность работы системы, уменьшая вероятность перегрева и выхода из строя оборудования.

Таким образом, регулирование возбуждения синхронных двигателей является критическим аспектом для обеспечения компенсации реактивной мощности и оптимальной работы электрических систем. Это не только способ снизить затраты на электроэнергию, но и повысить эффективность и надежность работы системы.

Для автоматического регулирования возбуждения используются специальные устройства, такие как автоматические регуляторы напряжения. Они мониторят напряжение и ток возбуждения и, исходя из заданных параметров, регулируют возбуждающую систему синхронного двигателя.

Автоматический регулятор напряжения (AVR) определяет разницу между заданными и реальными значениями напряжения возбуждения и корректирует его при необходимости. Если напряжение возбуждения ниже заданного значения, AVR увеличивает его путем изменения тока или поля возбуждения.

Если напряжение возбуждения выше заданного значения, AVR уменьшает его.

Эта автоматическая регулировка возбуждения позволяет синхронному двигателю поддерживать постоянную мощность и скорость в условиях изменяющейся нагрузки или сети. Это важно для обеспечения надежной работы и предотвращения повреждения двигателя.

В целом, автоматическое регулирование возбуждения у синхронных двигателей является ключевым фактором, который обеспечивает их стабильность и эффективность, а также защиту от повреждений[1-5].

1.4 Средства моделирования синхронных машин как элемент электроэнергетической системы

Средства моделирования синхронных машин играют важную роль в анализе и проектировании электроэнергетических систем. Синхронные машины, часто используемые в крупных электростанциях, могут быть сложными системами с различными параметрами и характеристиками, которые нужно учитывать при разработке электроэнергетических систем. С помощью средств моделирования можно создавать точные математические модели синхронных машин, учитывающих их поведение в различных режимах работы и в различных условиях.

С помощью средств моделирования можно проводить исследования, например, по анализу динамического поведения синхронных машин в случае возмущений или аварийных ситуаций, а также оценивать их влияние на работу всей электросистемы. Это позволяет инженерам и исследователям эффективно проектировать и управлять работой электроэнергетических систем, улучшать их надежность, эффективность и безопасность.

Средства моделирования синхронных машин, такие как программные комплексы для численного моделирования и симуляции, позволяют анализировать различные аспекты работы синхронных машин, включая их электромеханическое поведение, влияние на стабильность системы, электромагнитные процессы, потери мощности и многое другое. Такие исследования могут помочь в разработке усовершенствованных методик управления, оптимизации работы системы и повышении качества энергоснабжения.

В целом, средства моделирования синхронных машин позволяют более глубоко и детально изучать их характеристики и поведение как части электроэнергетической системы, обеспечивая тем самым более точное и надежное проектирование и управление электроэнергетическим оборудованием.

1.4.1 Rastrwin3

Программный комплекс RastrWin3 предназначен для решения задач по расчету, анализу и оптимизации режимов электрических сетей и систем. RastrWin используется более чем в 150 организациях на территории России,

Казахстана, Киргизии, Беларуси, Молдовы, Монголии, Сербии. В России основными пользователями являются Системный Оператор Единой Энергетической Системы (СО ЕЭС) и его филиалы, Федеральная Сетевая Компания (ФСК), МРСК, проектные и научно-исследовательские институты (Энергосетьпроект, ВНИИЭ, НИИПТ и т.д.).

RastrWin3 использует библиотеки .NET Framework. Программа установки RastrWin3 автоматически определяет наличие этих библиотек на компьютере пользователя и в случае, если .NET Framework не установлен, пытается загрузить и установить их. Сетевая активность программы установки не является источником опасности, поэтому на запросы системы или антивирусной программы на разрешение доступа программы установки к интернет следует отвечать утвердительно. В состав программного комплекса также входит компонент обновления, способный загружать обновления с этого сайта. Для этого компонента также необходимо разрешить доступ к интернет.

Расчетные модули в RastrWin:

- Расчет установившихся режимов электрических сетей произвольного размера и сложности, любого напряжения (от 0.4 до 1150 кВ).
- Полный расчет всех электрических параметров режима (токи, напряжения, потоки и потери активной и реактивной мощности во всех узлах и ветвях электрической сети).
- Расчет установившихся режимов с учетом отклонения частоты (без балансирующего узла).
- Контроль исходной информации на логическую и физическую непротиворечивость.
- Эквивалентирование (упрощение) электрических сетей.
- Оптимизация электрических сетей по уровням напряжения, потерям мощности и распределению реактивной мощности.
- Расчет положений регуляторов трансформатора под нагрузкой (РПН) и положений вольтодобавочных трансформаторов(ВДТ).
- Расчет предельных по передаваемой мощности режимов энергосистемы, определение опасных сечений.
- Структурный анализ потерь мощности – по их характеру, типам оборудования, районам и уровням напряжения.
- Проведение многовариантных расчетов по списку возможных аварийных ситуаций.
- Моделирование отключения ЛЭП, в том числе одностороннего, и определение напряжения на открытом конце.
- Моделирование генераторов и возможность задания его PQ-диаграммы.
- Моделирование линейных и шинных реакторов с возможностью их отключения и переноса линейного реактора в узел при отключении ЛЭП.
- Анализ допустимой токовой загрузки ЛЭП и трансформаторов, в том числе с учетом зависимости допустимого тока от температуры.
- Расчет сетевых коэффициентов, позволяющих оценить влияние

изменения входных параметров на результаты расчета, и наоборот, проанализировать чувствительность результатов расчета к изменению входных параметров.

- Расчет агрегатной информации по различным территориальным и ведомственным подразделениям (потребление, генерация, внешние перетоки).
- Сравнение различных режимов по заданному списку параметров.

В RastrWin входят средства подготовки и отображения однолинейной графической схемы:

- автоматизированная подготовка графической схемы на основе заданной расчетной, автоматический контроль соответствия расчетной и графической схем;
- подготовка окон (мест расположения) отображения численной информации;
- отображение текущей расчетной информации, быстрая замена типа отображаемой информации;
- проведение коммутаций (отключение/включение) и коррекций режимных параметров непосредственно на графической схеме;
- цветовое выделение номинальных напряжений и районов схемы, выделение номинальных напряжений толщиной;
- динамическая «заливка» схемы в зависимости от значения выбранного параметра (например, отклонения напряжения от номинального);
- контекстные макросы;
- отображение обобщенной информации (районы, территории, сечения);
- отображение энергетической схемы в виде «псевдо»-электрической сети.

1.4.2 SimInTech

Simulation In Technic – среда разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для контроллеров управления и графических дисплеев. SimInTech предназначен для детального исследования и анализа нестационарных процессов в различных объектах управления. Собственная разработка ООО "ЗВ Сервис. Номер в едином реестре российских ПЭВМ: 2379 (<https://reestr.digital.gov.ru/reestr/303729/>)

SimInTech обладает широкими возможностями для организации вычислений, связанных с решением алгебраических и дифференциальных уравнений.

Математические модели в SimInTech создаются посредством функционально-блочного программирования при помощи блоков, которые содержатся в различных библиотеках.

Для создания математических моделей SimInTech содержит библиотеки:

- теплогидравлики;

- электротехники;
- электрических приводов;
- силовых гидравлических/пневматических машин;
- механических взаимодействий;
- баллистики космических аппаратов;
- динамики полета летательных аппаратов в атмосфере;
- и т. д.

В SimInTech возможна разработка как простых моделей, подробно описывающих поведение какой-либо системы (например, RLC-контур с источником питания), так и сложных моделей, которые подробно описывают не только саму систему, но и алгоритмы управления, защиты, интерфейс управления и пр.

Для создания моделей используются шаблоны проектов, которые наиболее полно удовлетворяют решению того или иного спектра задач. В базовом дистрибутиве SimInTech доступны 7 шаблонов: схема модели общего вида, схема надежности, схема теплогидравлическая, схема ТРР, схема электрическая, пакет проектов и пустой проект.

В зависимости от выбранного шаблона в палитру блоков подгружаются соответствующие ему библиотеки блоков. Ряд шаблонов содержит заранее заготовленный список сигналов и/или базу сигналов.

Для организации обмена данными между расчетными схемами, созданными в разных шаблонах, используется база данных сигналов – структурированное хранилище переменных, используемых в одном или нескольких проектах, входящих в состав сложной модели.

База данных сигналов SimInTech является объектно-ориентированной и обеспечивает удобное решение следующих задач:

- передача данных между расчетными схемами комплексной модели;
- обеспечение возможности векторной обработки сигналов для типовых алгоритмов управления;
- объектно-ориентированное проектирование модели технических систем;
- автоматизацию создания и обработки переменных в комплексных моделях.

SimInTech обладает двумя библиотеками для моделирования электрических процессов: «ЭЦ-Динамика» и «ЭЦ-Статика».

При построении моделей с использованием элементов библиотеки «ЭЦ-Статика» моделируются действующие значения токов и напряжений, представленные в виде комплексных чисел. Реальный синусоидальный сигнал заменяется эквивалентным постоянным сигналом, значение которого равно амплитуде синусоиды деленной на $\sqrt{2}$.

Данный подход применим прежде всего для моделирования установившихся режимов в цепях с источниками, работающими с одной частотой, что характерно для энергетических систем.

Также подразумевается, что токи и напряжения не содержат высших гармоник, а если они есть, то используется их среднеквадратическое значение. При использовании этого метода в процессе моделирования будут получены только действующие значения токов и напряжений.

При построении моделей с использованием элементов библиотеки «ЭЦ-Динамика» моделируются мгновенные значения токов и напряжений.

Библиотека «ЭЦ-Статика» используется для моделирования установившихся и переходных процессов, длительность которых превышает период частоты питающей сети, например, пусков электродвигателей, длительности которых составляют до нескольких секунд, что многократно превышает период промышленной частоты 0,02 с. При моделировании допустимо использование крупного шага интегрирования, достигающего 0,02 – 0,1 сек, что позволяет уложиться в режим реального времени даже при схеме с большим числом блоков.

Библиотека «ЭЦ-Динамика» применяется для решения исследовательских или практических задач, в которых требуется моделировать электромагнитные процессы, длительность которых сопоставима с периодом питающей сети. Однако шаг интегрирования даже для сети промышленной частоты 50 Гц должен быть, как правило, не более 0,001 с.

1.4.3 Matlab

Matlab (MATrix LABoratory) - это интегрированная система моделирования и разработки, используемая для численного анализа, визуализации и решения задач в науке, инженерии и финансах.

Созданная компанией MathWorks, Matlab предлагает мощный язык программирования, который основан на матрицах и предоставляет широкий спектр встроенных функций для выполнения различных задач. От численной алгебры и статистики до оптимизации и обработки сигналов, Matlab позволяет исследователям и инженерам выполнять сложные вычисления и анализировать данные с высокой эффективностью.

Одной из ключевых особенностей Matlab является его способность к визуализации данных. Благодаря встроенным графическим инструментам и функциям, пользователи могут создавать высококачественные графики, диаграммы и анимации для иллюстрации результатов своих моделей. Это помогает лучшему пониманию данных и является полезным инструментом для презентаций и академических публикаций.

Matlab также поддерживает разработку пользовательских утилит и приложений с помощью своего графического интерфейса, который можно настроить в соответствии с нуждами пользователя. Это позволяет создавать интерактивные приложения с графическим интерфейсом (GUI), в которых пользователи могут управлять параметрами модели и получать результаты в режиме реального времени.

Важно отметить, что Matlab имеет обширное сообщество пользователей со всего мира, что обеспечивает доступ к множеству дополнительных ресурсов,

включая файлы обмена, скрипты и приложения, разработанные другими пользователями. Это позволяет быстро получать помощь и делиться своими наработками, что является важным аспектом системы моделирования.

Наконец, Matlab имеет поддержку для параллельных и распределенных вычислений, что обеспечивает масштабируемость вычислений и позволяет эффективно использовать вычислительные ресурсы. Это особенно важно для моделирования и анализа сложных систем, таких как большие сети или параллельные обработки.

Matlab представляет собой мощную и гибкую систему моделирования, которая находит применение во многих областях науки и инженерии. Сочетая в себе высокую производительность, широкий спектр функций и визуализацию, Matlab является незаменимым инструментом для исследователей и инженеров, работающих с численным анализом и моделированием.

Matlab Simulink - это интегрированная среда моделирования и симуляции систем, разработанная компанией MathWorks. Она позволяет инженерам и ученым визуализировать, анализировать и тестировать динамическое поведение различных систем.

Одной из ключевых особенностей Matlab Simulink является графический интерфейс, который позволяет создавать модели систем в виде блок-схемы. Блоки представляют различные компоненты системы, а связи между блоками обозначают потоки данных или энергии.

С помощью Matlab Simulink можно моделировать самые разные системы, начиная от электрических цепей и систем автоматического управления, заканчивая сложными многофизическими системами. Это позволяет инженерам проводить различные эксперименты и анализировать поведение системы в различных условиях.

Система также оснащена множеством встроенных библиотек, содержащих различные блоки и функции, которые упрощают процесс моделирования. Это включает в себя блоки для создания математических моделей, аналоговых и цифровых сигналов, регуляторов и многого другого.

Matlab Simulink также обладает возможностью проведения симуляций в режиме реального времени, что позволяет проверять и отлаживать модели в реальных условиях. Это полезно при разработке и оптимизации систем управления, а также при создании прототипов перед физической реализацией.

Система также интегрируется с другими инструментами Matlab, что позволяет использовать мощные аналитические и вычислительные возможности Matlab для анализа данных, оптимизации моделей и многое другое.

В целом, Matlab Simulink представляет собой мощное и гибкое средство для моделирования и симуляции различных систем. Его графический интерфейс, встроенные библиотеки и возможности симуляции в реальном времени делают его популярным выбором среди инженеров и ученых для решения различных задач моделирования и симуляции.

В рамках данной работы будет использована среда моделирования SimInTech.

2 Моделирование участка электрической сети

2.1 Математическое описание синхронных машин

Синхронная машина – это электрическая машина, которая работает на переменном токе и характеризуется наличием явного взаимодействия магнитного поля статора и ротора. Математическое описание синхронной машины включает в себя уравнения, описывающие ее электрические, механические и магнитные характеристики [1-5].

Одной из ключевых частей математического описания синхронной машины являются уравнения, описывающие ее электромагнитные процессы. В частности, уравнения, описывающие взаимодействие магнитных полей статора и ротора, играют важную роль в моделировании и анализе работы синхронной машины. В этих уравнениях учитывается зависимость между током и напряжением в обмотках статора и ротора, создаваемые магнитными полями.

Кроме того, математическое описание синхронной машины включает в себя уравнения, описывающие ее электрические параметры, такие как сопротивление, реактивное сопротивление и индуктивность, которые влияют на электрические потери и потоки мощности. Также учитывается механическая часть описания, которая описывает связь между механическим вращением ротора и выходной механической мощностью машины.

Эти математические модели позволяют анализировать динамическое поведение синхронной машины в различных режимах работы, включая стационарные и переходные процессы. Они также позволяют проводить компьютерное моделирование для анализа стабильности, эффективности и надежности синхронной машины в различных условиях эксплуатации, что является важной частью проектирования и управления электроэнергетическими системами.

Привыводе уравнений синхронной машины принимается ряд допущений:
индуктивность машины не зависит от токов,
так как ее магнитная система считается ненасыщенной;
распределение индукции магнитных полей статора и ротора вдоль окружности зазора машины считается синусоидальным; машина выполнена так,
что фазные обмотки статора и ротора относительно своих продольной и поперечной осей расположены симметрично;
демпферная система машины представлена двумя демпферными обмотками – продольной и поперечной –
магнитные оси которых совпадают соответственно с продольной и поперечной осью ротора.

Для синхронной машины, насчитывающей шесть контуров, составляют систему из шести уравнений: три для фаз А, В, С, одно для обмоток возбуждения и два для продольного и поперечного демпферных контуров.

Потокосцепления в них связаны стоками контуров шестью уравнениями через индуктивности и взаимные индуктивности обмоток соответствующих контуров.

Индуктивности и взаимные индуктивности

(за исключением машин с неявно выраженными полюсами) являются периодическими функциями угла $\gamma = \omega_0 t$, где ω_0 – синхронная частота вращения, а t – текущее время.

Будем рассматривать процессы в двигателе в вращающейся системе координат dq , ось d которой ориентирована по потоку ротора.

Ротор двигателя, являющийся постоянным магнитом, создает потокосцепление, равнопроизведению потока ротора на число витков обмотки статора. Направлен вектор этого потокосцепления по оси ротора от положительного полюса к отрицательному и отстает от вектора тока статора на некоторый угол ϕ .

Постоянный поток вращающегося ротора создает в обмотках статора вектор ЭДС, направленный под прямым углом к потоку и опережающий его на 90° (производная потокосцепления) [1-5].

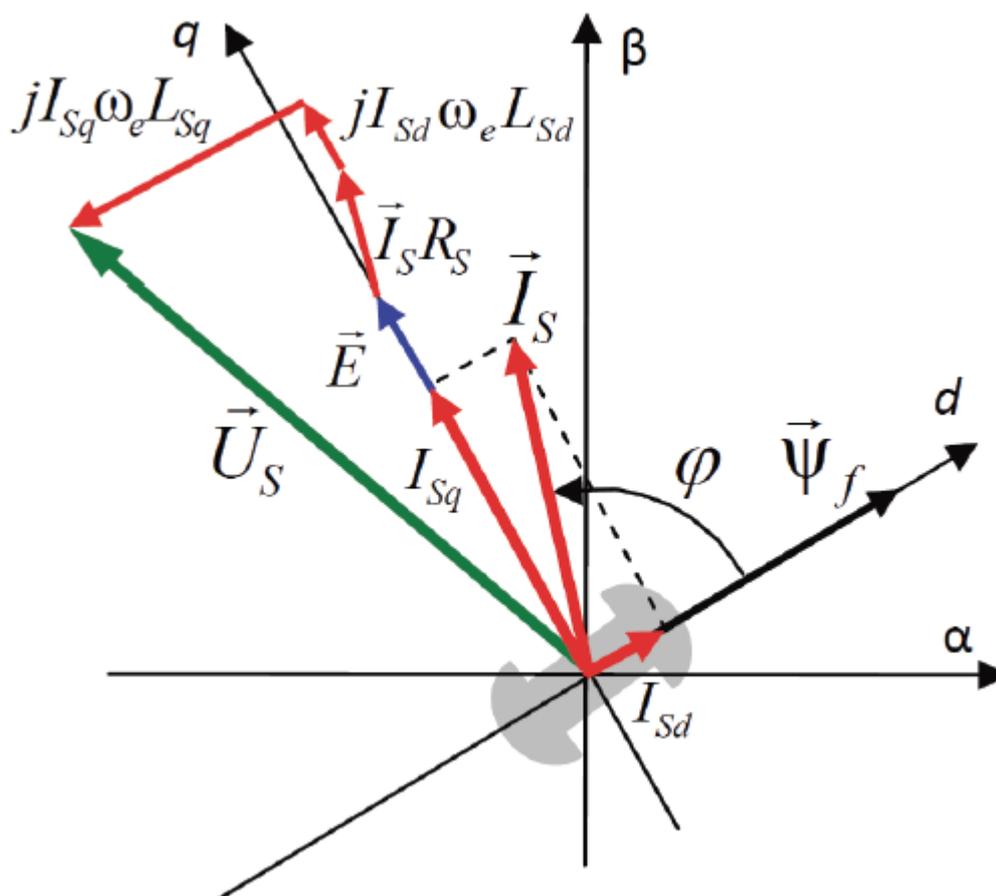


Рисунок 5 – Векторная диаграмма синхронного двигателя

Амплитуда вектора ЭДС определяется выражением:

$$E = \psi_f \omega_{\text{в}}$$

где $\omega_B = -$ скорость вращения поля
 ω_r – скорость вращения ротора
 p – число пар полюсов двигателя

Тогда можно записать:

$$\vec{U}_s = \vec{E} + \vec{I}_s \vec{R}_s + j\omega_B (\vec{I}_{sd} \vec{L}_{sd} + \vec{I}_{sq} \vec{L}_{sq})$$

где \vec{U}_s – вектор напряжения статора
 \vec{I}_s – вектор статора тока
 L_{sd}, L_{sq} – индуктивность статора по осям dq
 R_s – сопротивление статора

Момент двигателя возникает вследствие того, что на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует некая сила (сила Лоренца). Вывод формулы, определяющей момент, можно сделать исходя из соотношений, описывающих мощность двигателя, например так, как это сделано в книге Г.Г. Соколовского.

Будем считать, что момент возникает в результате силового взаимодействия между векторами тока и потока сцепления статора. А именно, что момент определяется векторным произведением действующих значений этих векторов.

Это действительно так, и в дальнейшем расчетная формула для момента получается точно такой же, как и при вышеупомянутом подходе нахождение момента через мощность [1-5].

Учитывая фазность и число пар полюсов двигателя, можно записать следующее выражения для вычисления момента двигателя:

$$\vec{M}_{вт} = 3Z_p \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \vec{I}_s \times \frac{1}{\sqrt{2}} \vec{\psi}_s \right) = \frac{3}{2} Z_p \vec{I}_s \times \vec{\psi}_s = \frac{3}{2} Z_p |\vec{I}_s| \times |\vec{\psi}_s| \sin\varphi$$

Попробуем записать формулу для вычисления момента в системе dq. Как известно, величина векторного произведения двух векторов равна площади параллелограмма, сторонами которого они являются.

Запишем площадь параллелограмма с сторонами через проекции этих векторов на оси dq.

Для этого вычислим удвоенную площадь треугольника:

$$|\vec{I}_s| \times |\vec{\psi}_s| \sin\varphi = 2S_{abc} =$$

$$= 2 \left(I_{sq} + \psi_{sd} - \frac{1}{2} \psi_{sd} \psi_{sq} - \frac{1}{2} I_{sd} - \frac{1}{2} (\psi_{sd} - I_{sd})(I_{sq} - \psi_{sq}) \right) =$$

$$= (I_{sq} \psi_{sd} - I_{sd} \psi_{sq})$$

где $\psi_{sd} \psi_{sq}$ – проекции потокосцепления и тока статора на оси

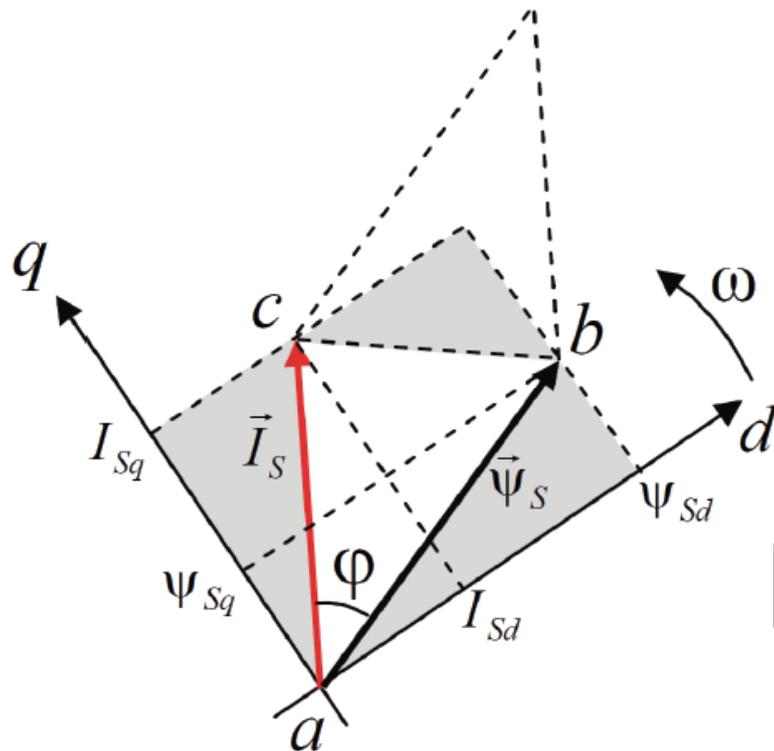


Рисунок 6 - Проекция потокосцепления и тока статора на оси.

Соответственно, формула для расчёта электромагнитного момента в системе dq будет выглядеть так:

$$M_{вт} = \frac{3Z_p}{2} (I_{sq} \psi_{sd} - I_{sd} \psi_{sq})$$

Имея ввиду, что потокосцепление статора, в свою очередь, формируется током индуктивности статора и потоком ротора, запишем выражения для его составляющих:

$$\psi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \psi_f$$

$$\psi_{sq} = L_{sq} I_{sq}$$

С учётом этих выражений перепишем уравнение для вычисления момента в следующем виде:

$$M_{\text{вт}} = \frac{3Z_p}{2} (I_{sq} \psi_f + I_{sd} I_{sq} (L_{sd} - L_{sq}))$$

2.2 Описание системы с помощью уравнений Парка-Горева

Уравнения Парка — Горева связывают мгновенные значения токов, магнитных потоков, напряжений в осях координат (d, q), жестко связанных с ротором.

Расчеты по уравнениям Парка — Горева довольно сложны и проводятся только при применении вычислительных машин. Обычно при аналитических расчетах, расчетах с помощью статических моделей (расчетных столов) и значительной части расчетов, выполняемых на вычислительных машинах, целесообразно пользоваться упрощенными уравнениями. Правильный выбор системы уравнений и необходимой точности анализа, соответствующей реальной технической задаче, составляет искусство инженера.

Дифференциальные уравнения синхронных машин дают возможность проводить анализ переходных процессов в электрических системах с учетом наибольшего количества влияющих факторов (изменений угловой скорости ротора, апериодических составляющих токов статора, периодических токов ротора, активного сопротивления в цепи статора генератора).

Опустив те или иные члены в уравнениях Парка — Горева, можно получить упрощенные уравнения, применяющиеся:

а) для расчетов токов коротких замыканий (без учета изменений скорости);

б) для расчета электромеханических переходных процессов, обычно без учета апериодических составляющих тока, статора и периодических тока ротора.

Мгновенные значения параметров режима — фазные и в осях d, q. Эти значения определяют как проекции на оси времени фаз a, b, c вектора тока, вращающегося со скоростью ω . Этот вектор тока (напряжения, э. д. с, потокосцепления) называют обобщенным [1-5].

$$\begin{aligned} i_a &= I \sin(\omega t + \alpha) \\ i_b &= I \sin(\omega t - 120^\circ + \alpha) \\ i_c &= I \sin(\omega t - 240^\circ + \alpha) \end{aligned}$$

Проекции обобщенного вектора тока на оси d и q, жестко связанные с ротором, дают значения, продольного и поперечного токов:

$$\begin{aligned} i_d &= I \cos \gamma \\ i_q &= I \sin \gamma \\ i_d &= \frac{2}{3} [i_a \cos \gamma + i_b \cos(\gamma - 120^\circ) + i_c \cos(\gamma - 240^\circ)] \\ i_q &= \frac{2}{3} [i_a \sin \gamma + i_b \sin(\gamma - 120^\circ) + i_c \sin(\gamma - 240^\circ)] \end{aligned}$$

При наличии токов нулевой последовательности в системе имеет место соотношение

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c)$$

Соотношения, аналогичные приведенным выше, справедливы для напряжений, э. д. с. и потокосцеплений.

Соотношения между мгновенными значениями фазных величин и величинами в продольной и поперечной осях имеют вид:

$$\begin{aligned} i_a &= i_d \cos \gamma + i_q \sin(\gamma) + i_0 \\ i_b &= i_d \cos(\gamma - 120^\circ) + i_q \sin(\gamma - 120^\circ) + i_0 \\ i_c &= i_d \cos(\gamma + 120^\circ) + i_q \sin(\gamma + 120^\circ) + i_0 \end{aligned}$$

Угол γ меняется во времени:

$$\begin{aligned} \gamma &= \omega_0 t + \delta \\ \delta &= \frac{\psi_q}{\psi_d} \end{aligned}$$

В случае симметричного режима системы токи нулевой последовательности отсутствуют и выражения упрощаются.

Значения ψ_d и ψ_q определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \psi_d &= G(p)U_B + X_d(p)i_d \\ \psi_q &= X_q(p)i_q \end{aligned}$$

где $G(p)$ -операторная проводимость машины; $X_d(p)$ -операторное сопротивление машины в продольной оси; $X_q(p)$ -то же в поперечной оси; U_B — напряжения возбуждения машины.

Для машины без успокоительных обмоток и эквивалентных им контуров

$$\begin{aligned} G(p) &= \frac{1}{T_{d0}p + 1} \frac{x_{afd}}{R_{fd}} \\ X_d(p) &= \frac{x'_d T_{d0}p + x_d}{T_{d0}p + 1} \\ X_q(p) &= x_q \end{aligned}$$

Если известна э. д. с. E_q , по ψ_d можно найти так:

$$\psi_d = \frac{1}{T_{d0}p + 1} E_q - X_d(p)I_d = G_0(p)E_q - X_d(p)I_d$$

Для машины с успокоительными обмотками в продольной и поперечной осях и определяются теми же уравнениями.

2.2.1 Уравнения Парка — Горева для синхронной машины в операторной форме

Эти уравнения при принятых направлениях осей имеют вид:

$$\begin{aligned} U_d &= -p\psi_d - \psi_q p\gamma - I_d r \\ U_q &= p\psi_d \gamma - \psi_q p - I_q r \\ U_0 &= -p\psi_0 - I_0 r_0 \end{aligned}$$

где $U_d = ;$
 $U_q = i;$
 $p\gamma = \frac{d(\omega_0 t + \delta)}{dt} = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt}$

В системе относительных единиц α ; тогда $p\gamma = 1$.

Третье уравнение системы относится к случаю несимметричного режима или несимметричной схемы.

Уравнения, приведенные выше, полностью описывают переходный процесс машины, работающей на шины неизменного напряжения. Для анализа переходного процесса в сложной системе уравнения составляются для каждого элемента (генераторов, нагрузок, участков сети) и решаются совместно [1-5].

Решение уравнений, описывающих переходный процесс в системе Решение приведенной выше системы уравнений относительно токов или других величин, рассматриваемых как неизвестные, проводится в операторной форме (для изображений). Например, находятся значения токов в виде:

$$\begin{aligned} i_d(p) &= \frac{D_1(p)}{D(p)} \\ i_q(p) &= \frac{D_2(p)}{D(p)} \end{aligned}$$

где $D_1(p)$,

$D_2(p)$ -частные определители системы; $D(p)$ -общий определитель системы.

Характер переходного процесса в системе определяется знаком вещественной части корней определителя $D(p)$.

При $R_e(p_1, p_2, \dots, p_r)$ переходный процесс затухающий.

Если изменения напряжений U_d , заданы, то можно записать:

$$i_d(p) = \frac{a_1(p)}{D(p)} U_d + \frac{a_2(p)}{D(p)} U_q + \frac{a_3(p)}{D(p)} U_B$$

$$i_q(p) = \frac{b_1(p)}{D(p)} U_d + \frac{b_2(p)}{D(p)} U_q + \frac{b_3(p)}{D(p)} U_B$$

Токи как функции времени находят, переходя от изображения к оригиналам, что может быть сделано с помощью формулы разложения.

Уравнения для вращающего момента и мощности во время относительного движения ротора при принятых направлениях осей момент электромагнитных сил, действующих на ротор, в общем случае имеет вид

$$M = \frac{3}{2} (i_q \psi_d - i_d \psi_q)$$

При подстановке и выраженных через токи и реактивные сопротивления, электромагнитный момент может быть вычислен согласно

$$M = \frac{2}{3} [x_d - x_q] i_d i_q + x_{afd} i_B i_q$$

В системе относительных единиц, где коэффициент 3/2 учтен соответствующим выбором базисных величин,

$$M = i_q \psi_d - i_d \psi_q$$

Связь между мощностью, отдаваемой в сеть, и моментом следующая:

$$P = Md$$

где $\omega = \omega$ в относительных единицах;

$$\omega = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt} = 1 - s$$

$$\omega_0 = 1$$

Электромагнитная мощность генератора, передаваемая с ротора на статор,

$$M\omega = M\omega_0 + \frac{d\delta}{dt}$$

Уравнение относительного движения ротора в общем виде:

$$T_j = \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_{\text{мвх}} - M_{\text{эл}}$$

$$M_{\text{эл}} = \frac{P}{\omega}$$

В относительных единицах

$$M_{\text{эл}} = \frac{P}{1 - s}$$

Упрощенные уравнения Парка — Горева для определения параметров режима при переходных электромеханических процессах. Эти уравнения применяются при расчетах токов коротких замыканий, устойчивости и т. д. При этом отказываются от учета влияния:

- 1) аperiodической составляющей тока статора (трансформаторной э. д. с);
- 2) периодических токов ротора, связанных с аperiodическими составляющими тока статора;

3) активного сопротивления в цепи статора.

Тогда в системе относительных единиц при $\omega = \alpha$ уравнения Парка — Горева для синхронной машины будут иметь вид:

$$U_d = -\psi_q$$

$$U_q = -\psi_d$$

В соответствии с этим упрощаются выражения для токов: $I_d(p)$. Выражения мощности и электромагнитного момента в этих условиях будут совпадать, так как при принятых предпосылках отдаваемая мощность численно равна вращающему моменту [1-5]. Для симметричного или условно приведенного к симметричному режиму (метод симметричных составляющих) получим:

$$P = M = U_d I_d + U_q I_q$$

Здесь и берутся с учетом принятых допущений. Уравнение относительного движения ротора при принятых допущениях имеет вид

$$T_j = \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{\text{мвх}} - P_{\text{эл}}$$

2.3 Упрощение модели синхронных машин

Рассматривая уравнения фазных напряжений совместно с уравнениями переходных процессов от трехфазной к двухфазной системе d-q координат, получают два уравнения Парка-Горева, которые совместно с уравнениями напряжений контуров ротора позволяют исследовать любой переходный процесс в синхронной машине.

Очень часто в полученной системе уравнений не учитывают уравнения демпферных контуров, а их действие учитывается при определении коэффициентов демпфирования в уравнение электромеханических процессов. В этом случае система уравнений упрощается с пяти до трёх:

$$x_{ad} \frac{dI_f}{\omega_0 dt} + R I_d + x_q I_q = -U_d$$

$$x_d I_d - I_q - E_q + R I_q = -U_q$$

$$\frac{3}{2} x_d \frac{dI_d}{\omega_0 dt} + x_f \frac{dI_f}{\omega_0 dt} + R_f I_f = U_f$$

где x_d , x_q , x_{ad} – соответственно индуктивные сопротивления по продольной оси d, поперечной оси q,

взаимоиндукции между обмоткой возбуждения и фазными обмотками;

x_f , R_f – индуктивное и активное сопротивление обмотки возбуждения;

I_d , I_q – токи машины по осям d и q;

E_q – ЭДС по оси q,

наводимая потоками обмотки возбуждения в фазных обмотках статора;

U_d , U_q – напряжения машины по осям d и q;

R – активное сопротивление фазной обмотки.

В уравнениях не учитываются электромагнитные переходные процессы в статорных обмотках, что дает основание для их записи относительно действующих значений I_d , I_q , U_d , U_q [1-5].

Уравнения движения ротора:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \pm \omega_{\text{МН}}^{-1} (P_{\text{п}} - P_{\text{с}} - P_{\text{а}})$$

где J – момент инерции ротора машины совместно с приводимым механизмом или приводной турбиной;

$P_{\text{п}}$ –

мощность привода в движении механизма у синхронного двигателя и мощность приводного двигателя у синхронного генератора;

$P_{\text{с}}$,

$P_{\text{а}}$ – синхронная и асинхронная мощность машины;

знак плюс для генераторного режима, а знак минус для двигательного режима; $\omega_{\text{МН}}$ – текущее и номинальное значение угловой скорости машины.

Синхронная мощность неявнополюсной машины:

$$P_c = P_{cm} \sin \theta$$

Является синусоидальной функцией внутреннего угла и пропорциональна величине максимальной мощности:

$$P_{cm} = \frac{U_2 E_q}{x_d}$$

где U_2 , E_q – линейные значения напряжения сети и ЭДС машины поперечной оси q;

x_d – индуктивное сопротивление машины по продольной оси d.
Асинхронная мощность

$$P_a = \frac{P_{am}}{s_m} S$$

где P_{am} , s_m – максимальные значения мощности и скольжения
Внутренний угол машины:

$$\begin{cases} p_m \int (\omega_M - \omega_{MH}) dt \\ p_m \int (\omega_{MH} - \omega_M) dt \end{cases}$$

где p_m – число пар полюсов машины.

После первичного дифференцирования

$$\frac{d\theta}{dt} = \begin{cases} p_m (\omega_M - \omega_{MH}) \\ p_m \omega_{MH} - \omega_M \end{cases}$$

вторичного –

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \begin{cases} p_m \frac{d\omega_M}{dt} \\ -p_m \frac{d\omega_{MH}}{dt} \end{cases}$$

Скольжение:

$$s = \begin{cases} \omega_{MH}^{-1} (\omega_M - \omega_{MH}) \\ \omega_{MH}^{-1} (\omega_{MH} - \omega_M) \end{cases}$$

Из совместного рассмотрения всех вышеуказанных выражений, следует:

$$\frac{\omega_{\text{MH}} J d^2 \theta}{p_m dt^2} = P_{\text{п}} - P_{\text{с}} - P_{\text{а}}$$

$$\frac{\omega_{\text{MH}} J d^2 \theta}{p_m dt^2} + \frac{P_{\text{аH}}}{p_m s_{\text{H}} \omega_{\text{MH}}} \frac{d\theta}{dt} + \frac{U_2 E_q}{x_d} \sin \theta = P_{\text{н}}$$

2.4 Моделирование синхронного двигателя и компенсирование в SimInTech

Средства моделирования синхронных машин играют важную роль в анализе и проектировании электроэнергетических систем. Синхронные машины, часто используемые в крупных электростанциях, могут быть сложными системами с различными параметрами и характеристиками, которые нужно учитывать при разработке электроэнергетических систем. С помощью средств моделирования можно создавать точные математические модели синхронных машин, учитывающих их поведение в различных режимах работы и в различных условиях.

С помощью средств моделирования можно проводить исследования, например, по анализу динамического поведения синхронных машин в случае возмущений или аварийных ситуаций, а также оценивать их влияние на работу всей электросистемы. Это позволяет инженерам и исследователям эффективно проектировать и управлять работой электроэнергетических систем, улучшать их надежность, эффективность и безопасность.

Средства моделирования синхронных машин, такие как программные комплексы для численного моделирования и симуляции, позволяют анализировать различные аспекты работы синхронных машин, включая их электромеханическое поведение, влияние на стабильность системы, электромагнитные процессы, потери мощности и многое другое. Такие исследования могут помочь в разработке усовершенствованных методик управления, оптимизации работы системы и повышении качества энергоснабжения.

Компьютерное моделирование также позволяет учесть различные факторы, влияющие на работу синхронного двигателя. Например, модель может учитывать электрические параметры двигателя, его конструкцию, условия окружающей среды и так далее. Это позволяет получить более точные и реалистичные результаты, что помогает разработчикам принимать обоснованные решения и улучшать проектирование двигателей.

Компьютерное моделирование синхронного двигателя также имеет широкий спектр применений. Например, оно может использоваться для определения оптимальных настроек регуляторов и контроллеров двигателя, анализа энергетической эффективности и потерь, а также для оптимизации работы двигателя в режиме переменной и постоянной скорости [1-5].

В целом, средства моделирования синхронных машин позволяют более глубоко и детально изучать их характеристики и поведение как части

электроэнергетической системы, обеспечивая тем самым более точное и надежное проектирование и управление электроэнергетическим оборудованием.

```

1  Pnom=1250 ;
-  Unom=6e3 ;
-  CosF=0.9;
-  fnom=50 ;
-  Nnom=3000;
-  var Sb,Ub,Ib, wb, Zb, Lb, wr_nom;
-  const sqrt3 = sqrt(3);
-  Sb = Pnom*1e3/CosF;
-  Ub = Unom;
10  Ib = Sb/Ub/sqrt(3);
-  Zb = Ub^2/Sb;
-  wb = 2*pi*fnom;
-  Lb = Zb/wb;
-  wr_nom = Nnom/30*pi;
-  Ufnom=46;
-  Ifnom=253;
-
-  //Xs_oe = submodel.Zs_oe[1];
-  R1_oe = 0.022835274;
20  Xd_oe = 1.37;
-  Xdd_oe = 0.2;
-  //Xddd_oe = submodel.XXd_oe[3];
-  Xq_oe = 1.37;
-  //Xqq_oe = submodel.XXq_oe[2];
-  Tdd0 = 0.5;
-  //Tddd0 = submodel.Tdq0[2];
-  //Tqq0 = submodel.Tdq0[3];
-  Xs_oe=0.12;
-  Xad_oe=Xd_oe-Xs_oe;
30  Tf=0.367;
-  Rf=Ufnom/Ifnom;
-
-
-  //Определение расчетных параметров
-  X1dd = xdd_oe*Zb;
-  L1dd = X1dd/wb;
-  R1 = R1_oe*Zb;
-  //U0im = 0;
-  //E1 = sqrt((Ug0+Ig0*xddd_oe*sinf0)^2+(Ig0*xddd_oe*submodel.cosf0)^2)*Unom;
40  //U0re = E1;

```

Рисунок 7—Программный код модели двигателя

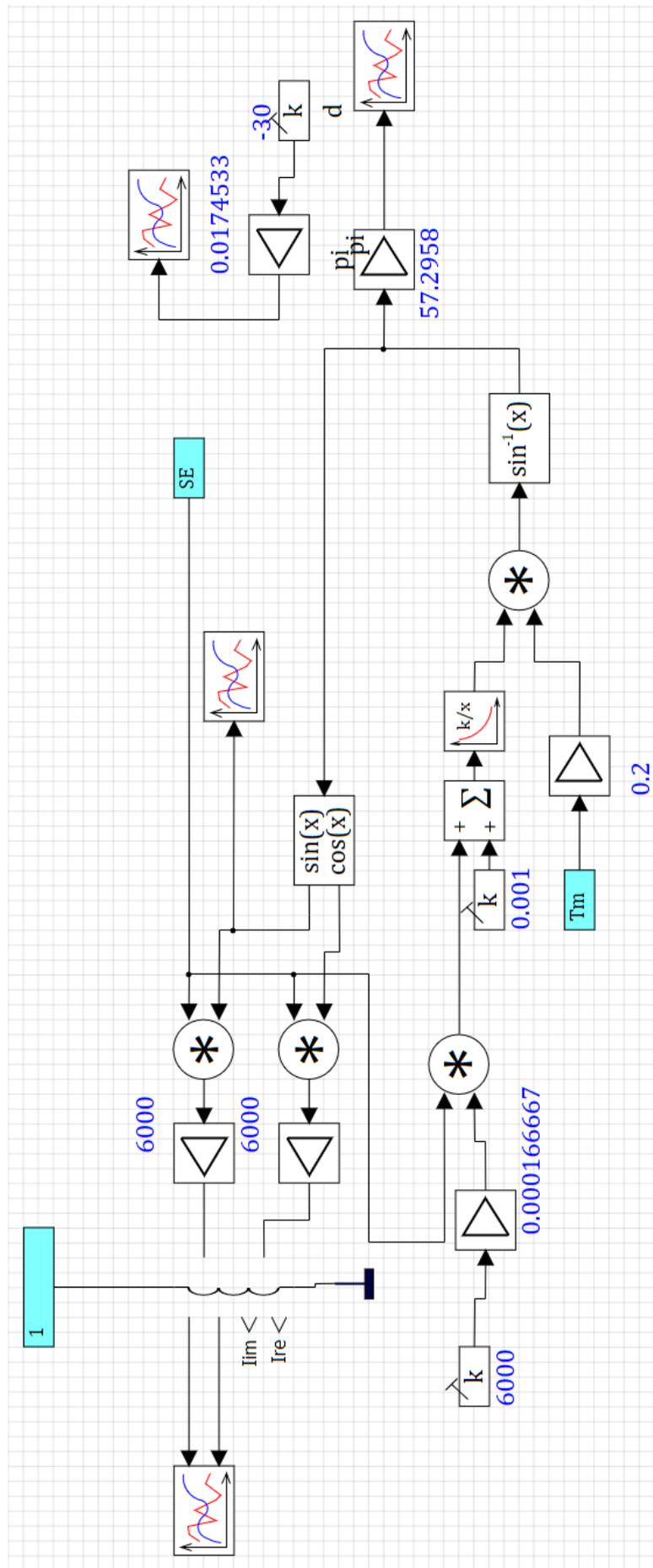


Рисунок 8–Модель синхронного двигателя в SimInTech

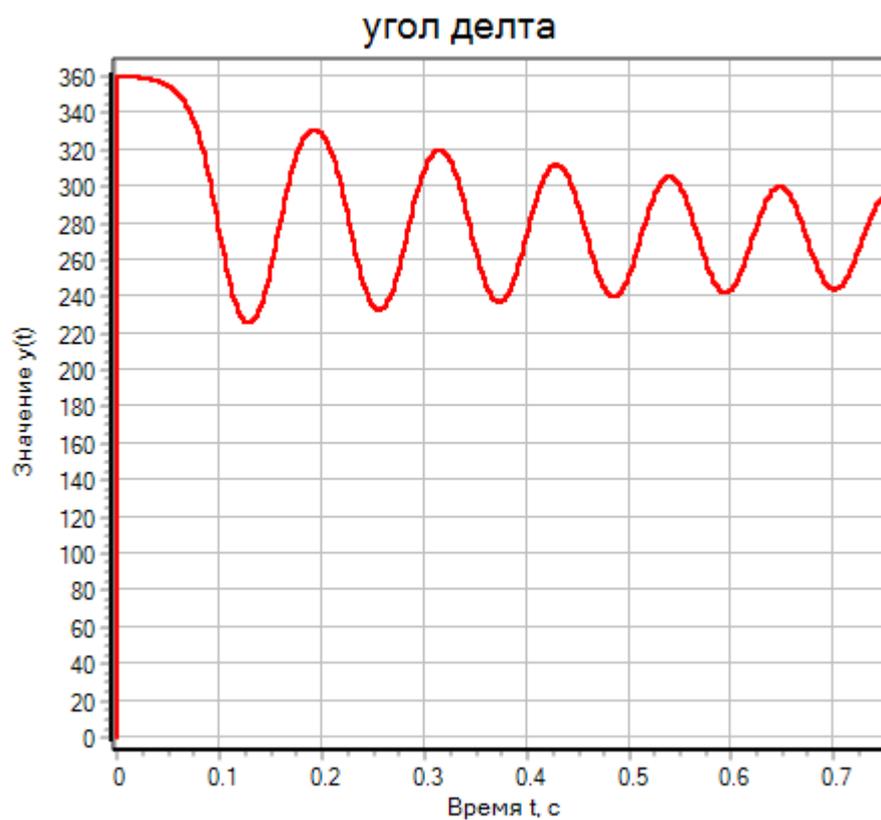


Рисунок 9 – Угол дельта (до 1 секунды)

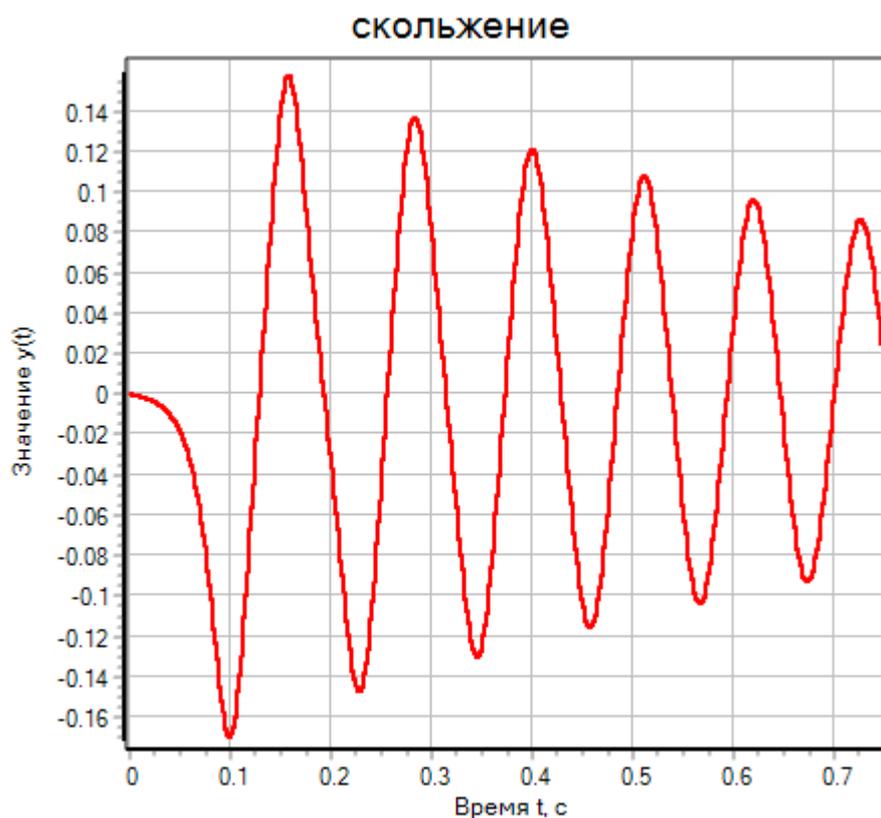


Рисунок 10 – Скольжение (до 1 секунды)

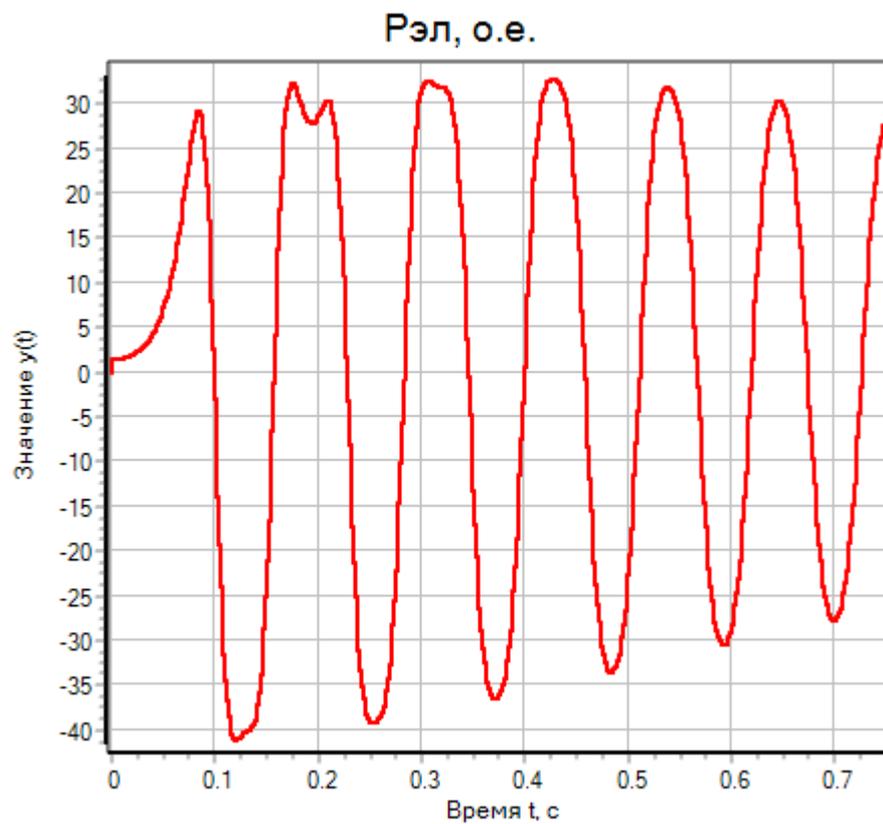


Рисунок 11 – Мощность (до 1 секунды)
угол дельта

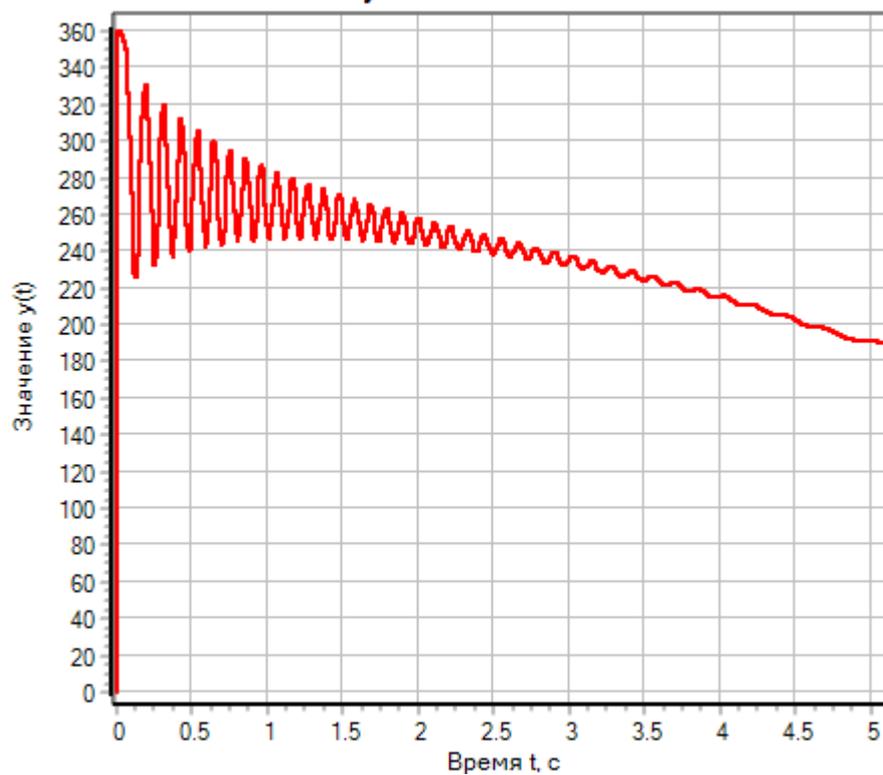


Рисунок 12 – Угол дельта (установившийся режим)

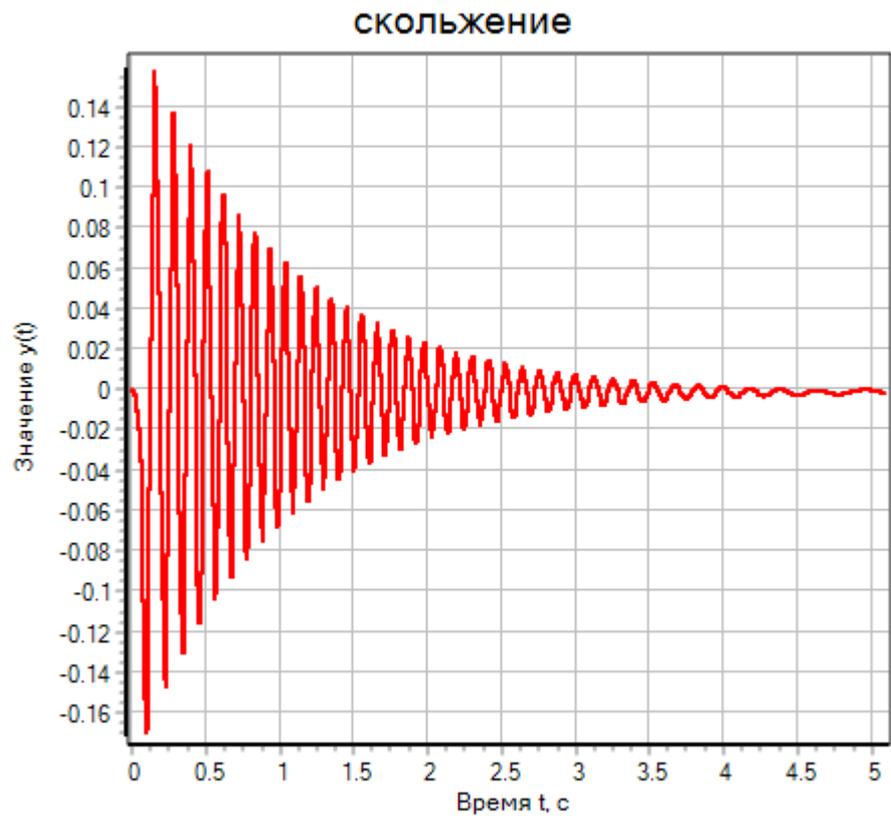


Рисунок 13 – Скольжение (установившийся режим)

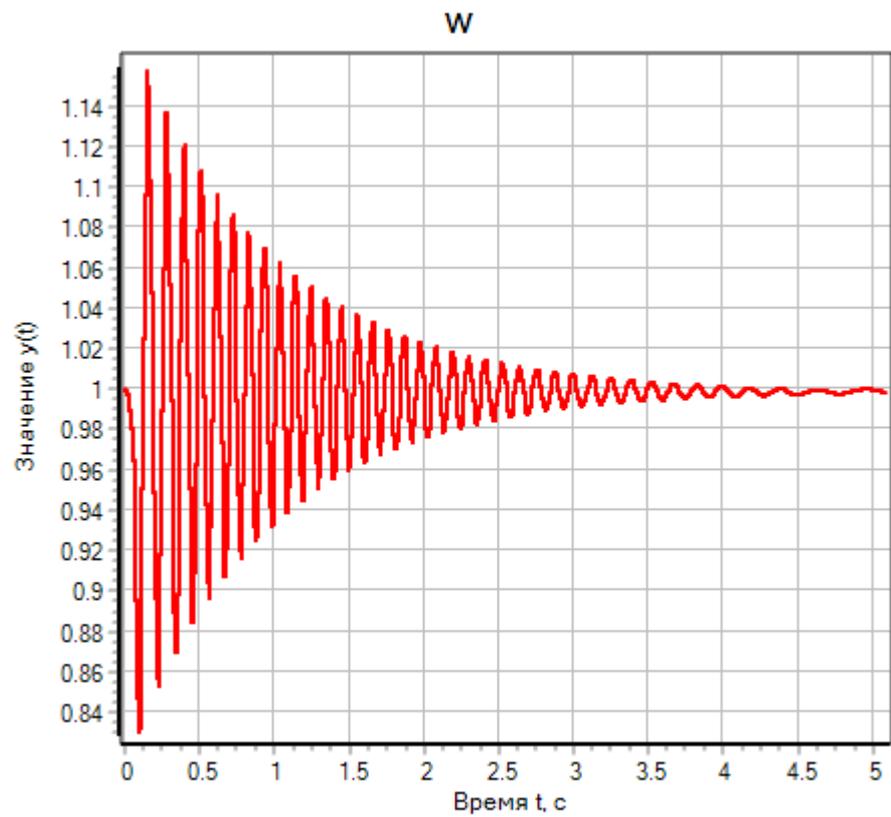


Рисунок 14 – Обороты (установившийся режим)

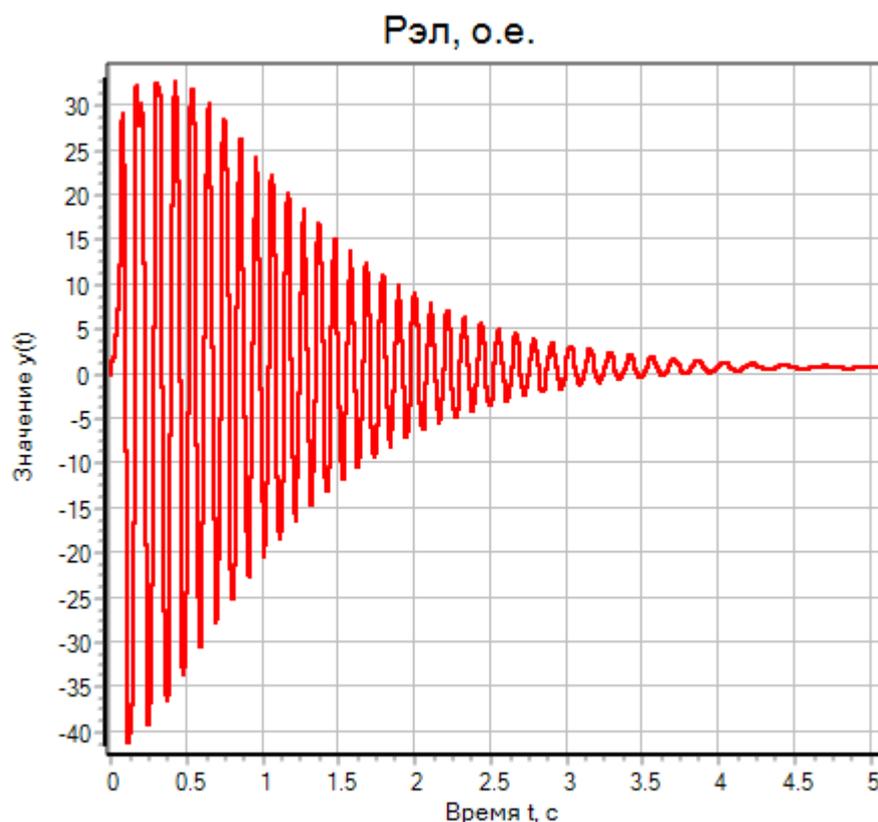


Рисунок 15 – Мощность (установившийся режим)

2.5 Модель системы APB в SimInTech

Автоматический регулятор возбуждения – это устройство, предназначенное для контроля и поддержания оптимального уровня возбуждения в электрической системе, такой как генератор или электродвигатель.

Одной из основных функций автоматического регулятора возбуждения является поддержание стабильности напряжения в системе. Когда потребление энергии возрастает, электрогенератору требуется больше мощности для поддержания стабильного напряжения. Автоматический регулятор возбуждения регулирует мощность возбуждающей системы, чтобы обеспечить требуемый уровень напряжения.

Регулирование мощности возбуждающей системы является важной частью работы в различных промышленных процессах, особенно в энергетическом секторе. Оно относится к способности управлять электрической мощностью, которая поставляется на возбудителя генератора или машины постоянного тока.

Одним из основных методов регулирования мощности возбуждающей системы является изменение поля возбуждения или тока в обмотках возбудителя. Когда ток возбуждения изменяется, меняется и магнитное поле внутри генератора, что в конечном итоге влияет на выходную мощность.

Для достижения точного регулирования мощности возбуждающей системы применяются различные устройства и регуляторы. Один из наиболее

распространенных приборов — это автоматический регулятор напряжения (АРН), который контролирует напряжение генератора и автоматически подстраивает его, чтобы поддерживать заданное значение напряжения.

Другим методом регулирования мощности является использование роторного регулятора скорости, который изменяет скорость вращения ротора генератора. Это в свою очередь влияет на силу тока возбуждения и, соответственно, на выходную мощность [4, 10].

Важно отметить, что регулирование мощности возбуждающей системы позволяет адаптировать работу генератора к изменяющимся условиям нагрузки и поддерживать стабильность электрической сети. Это особенно важно при работе с переменными нагрузками, где требуется постоянное или изменяемое значение мощности.

Кроме того, автоматический регулятор возбуждения также имеет функцию защиты генератора от перенапряжений и перегрузок. Он контролирует и регулирует ток возбуждения, чтобы предотвратить повреждение электрооборудования в случае аварийных ситуаций.

Защита генератора от перенапряжений и перегрузок является фундаментальным аспектом в обеспечении его бесперебойной работы и продления срока службы. Генераторы используются в различных сферах, включая промышленность, строительство, сельское хозяйство и даже в бытовых целях.

Перенапряжение возникает, когда напряжение в электрической сети превышает нормативные значения. Оно может произойти вследствие различных событий, таких как молния, неисправность оборудования или неправильное функционирование силового провода. При перенапряжении у генератора возникают высокие электрические токи, которые могут повредить его электрические компоненты, привести к перегрузке и обрыву цепи. Определенные компоненты генератора, такие как статоры и роторы, могут также пострадать от перенапряжений, что приведет к снижению их работоспособности и ухудшению эффективности генератора в целом.

Перегрузка является еще одной серьезной проблемой, с которой сталкиваются генераторы. Она возникает, когда нагрузка на генератор превышает его максимальную границу. Это может произойти, если генератор используется для подключения слишком большого количества электрических приборов или если оборудование находится в плохом техническом состоянии. Перегрузка нагружает работу генератора и увеличивает риск повреждения его внутренних компонентов, таких как двигатель, альтернатор или регулятор напряжения.

При отсутствии защиты от перенапряжений и перегрузок генератор может не только выйти из строя в неполадках, но и стать опасным для окружающей среды и пользователя. Перегрев и короткое замыкание могут привести к возгоранию генератора, а также вызвать травму или даже гибель для людей, находящихся поблизости. Кроме того, поврежденный генератор может привести к простоям производства или серьезным экономическим потерям, особенно если он используется в коммерческих целях.

Поэтому важно иметь защиту генератора от перенапряжений и перегрузок. Существует несколько методов защиты, включая автоматические предохранители, повышенную изоляцию и автоматические регуляторы напряжения. Они обнаруживают возникающие перегрузки и перенапряжения, и автоматически отключают генератор от системы перед тем, как повреждения станут непоправимыми.

В конечном итоге, обеспечение защиты генератора от перенапряжений и перегрузок является важным фактором для его надежной и безопасной работы. Это не только способствует продлению срока службы генератора, но и предотвращает серьезные повреждения и экономические потери. Поэтому, при использовании генератора, следует обязательно установить соответствующие устройства защиты и регулярно проверять их работоспособность.

Современные автоматические регуляторы возбуждения обычно оснащены микропроцессорными устройствами, которые позволяют точно управлять и контролировать достаточно сложные системы. Они имеют возможность настраиваться в соответствии с требованиями и динамическими характеристиками конкретной системы, а также могут выполнять функцию самодиагностики и предупреждать о выходе системы из строя.

В итоге, автоматический регулятор возбуждения является неотъемлемой частью электрических систем, способной обеспечить стабильность, надежность и защиту электрооборудования от повреждений. Он обеспечивает бесперебойную работу генераторов и электродвигателей, способствуя эффективной и безопасной передаче энергии.

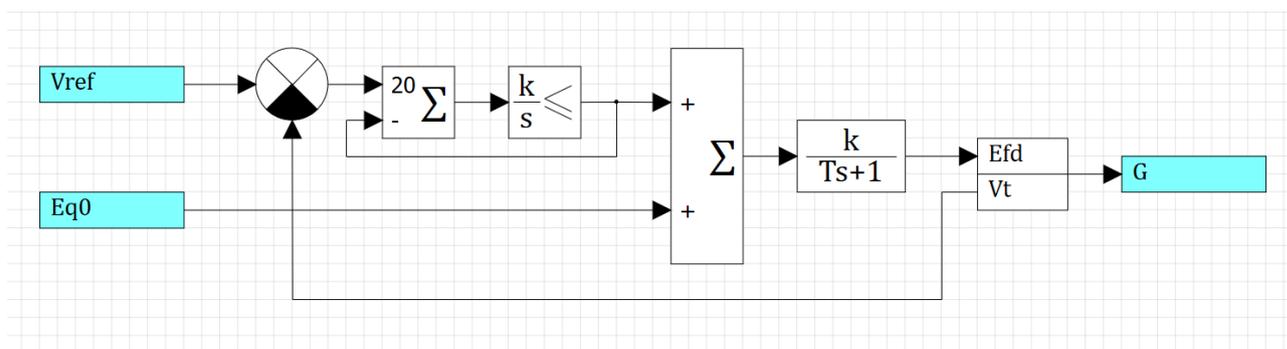


Рисунок 16 – Модель АВР в SimInTech

2.6 Моделирование участка электрической сети в SimInTech

Моделирование участка электрической сети является важным инструментом для анализа и оптимизации электроэнергетических систем. Это процесс создания компьютерной модели участка сети, позволяющей имитировать электрическую нагрузку, поток энергии и другие параметры системы.

Одной из основных задач моделирования является предсказание поведения системы при различных условиях работы. Например, модель может показать, какой эффект будет иметь изменение нагрузки на участке или включение/выключение определенных электрических устройств.

Моделирование также позволяет исследовать эффективность и надежность системы. Например, можно проанализировать, как изменение параметров системы может повлиять на ее эффективность и благополучное функционирование. Это помогает инженерам принять обоснованные решения о реконструкции или модернизации участка сети [11-13].

Дополнительно, моделирование участка электрической сети может использоваться для прогнозирования потребления электроэнергии и определения оптимального плана развития системы. Путем анализа модели в различных сценариях возможно определить оптимальные точки подключения новых устройств, провести оценку нагрузки на сеть и определить необходимость новых инфраструктурных решений.

Инструменты моделирования, такие как программы для расчета электромагнитных полей и средство виртуальной реальности, позволяют осуществить более точное и реалистичное представление физических и электрических свойств системы.

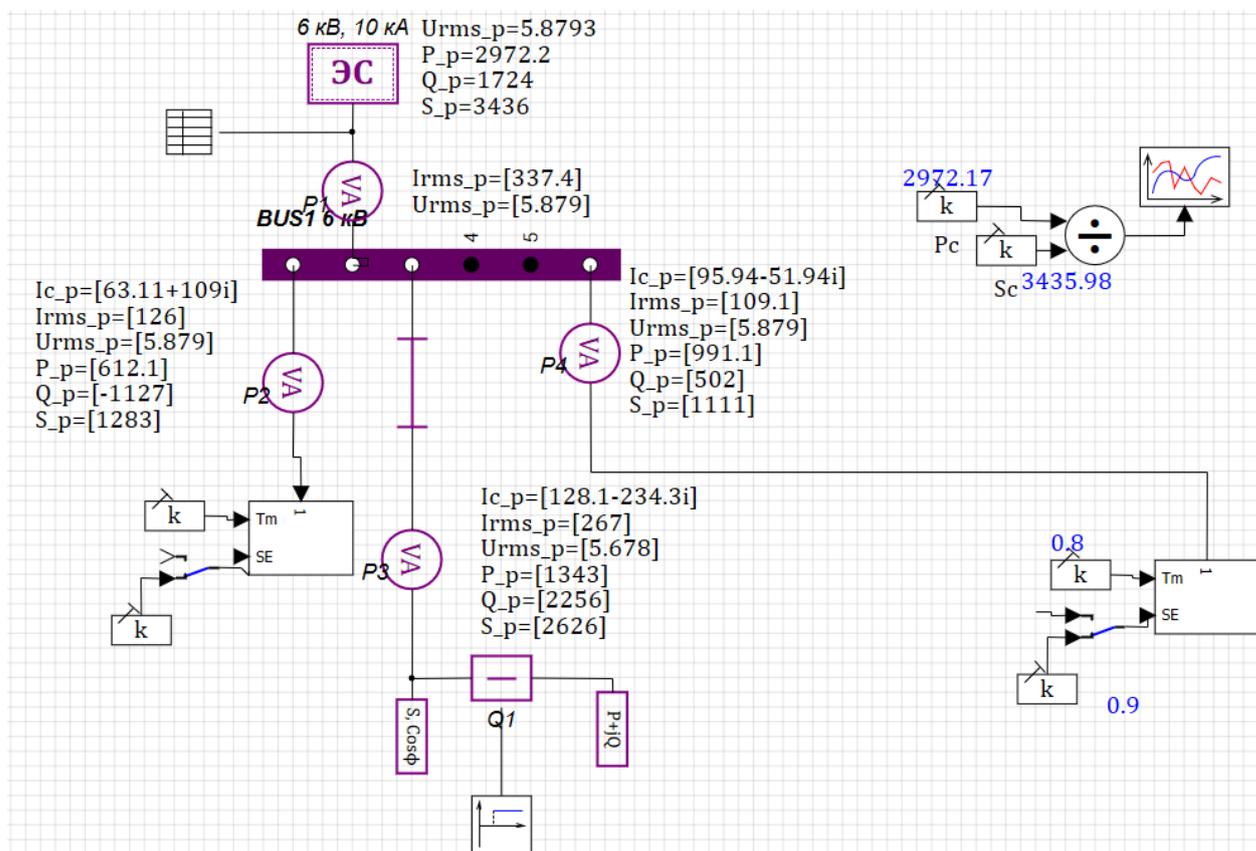


Рисунок 17 – Модель участка электрической сети в SimInTech

Имя переменной	Тип	Значение	Флаги
[-] Локальные переменные			
sb	Вещественное	1388888.9	
ub	Вещественное	6000	
ib	Вещественное	133.6459	
wb	Вещественное	314.15927	
zb	Вещественное	25.92	
lb	Вещественное	0.082505922	
wr_nom	Вещественное	314.15927	
sqrt3	Вещественное	1.7320508	const;
[+] Основная секция кода			
[+] Секция инициализации			
Секция финализации			
[-] Интерпретируемые свойства			
0 : R=1			
1 : L=1dd			
2 : a=xdd_oe			
3 : a=(1)/(unom)			
4 : a=unom			
Функции			

Рисунок 18 – Параметры генератора модели электрической сети в SimInTech

Название	Имя	Формула	Значение
[-] Основные параметры			
Минимальный шаг	hmin	1e-4	0.0001
Максимальный шаг	hmax	1e-4	0.0001
Начальный шаг интегрирован...	startstep		0
Метод интегрирования	intmet		ARK21(Адаптивный...
Начальное время расчёта	starttime		0
Конечное время расчёта	endtime		4
Относительная ошибка	relerr		0.0001
Абсолютная ошибка	abserr		1E-6
Относительная ошибка сравн...	time_rel_e...		1E-12
Начальное значение неиници...	InitOutputs...		0
[+] Генерация кода			
[+] Управление расчётом			
[+] Настройки решения НАУ			
[+] Визуализация данных			
[+] Удалённая отладка кода			
[+] Сортировка блоков			
[+] Тонкие настройки решения СЛАУ			
[+] Тонкие настройки решения НАУ			
[+] Электрические схемы			

Рисунок 19 – Параметры расчётной модели электрической сети в SimInTech

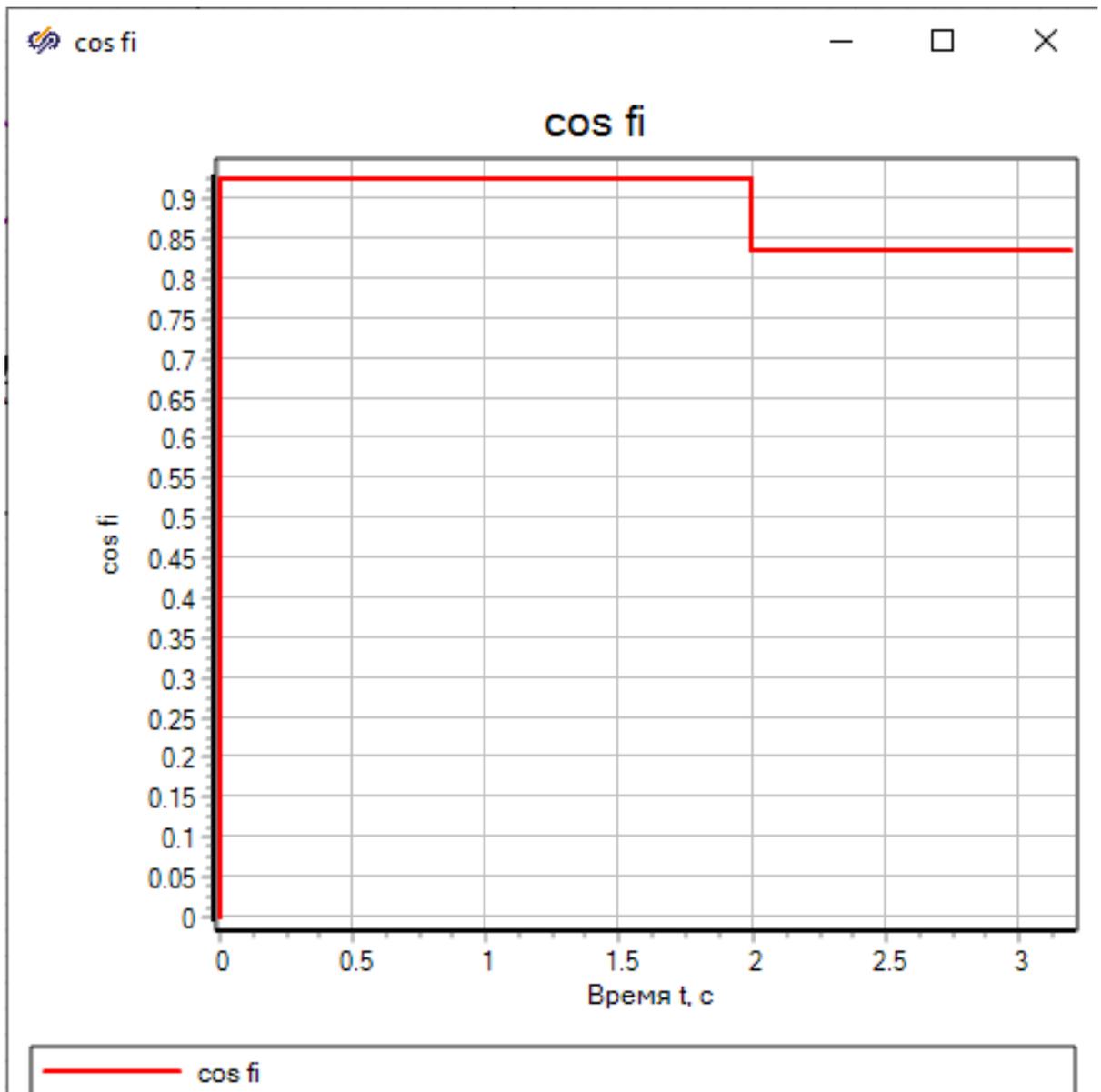


Рисунок 20 – График изменения коэффициента мощности модели электрической сети в SimInTech

3 Стабилизация коэффициента мощности

3.1 Постановка задачи

Под стабилизирующей системой управления в рамках данной работы мы будем подразумевать систему, алгоритм работы, который обеспечивает поддержание управляемой величины постоянной.

Следует отметить, что стабилизирующие системы являются наиболее распространёнными в рамках промышленной автоматики. Их применяют для стабилизации разнообразных физических величин, к которым, в частности, относится рассматриваемый в работе коэффициент мощности [4, 10].

Алгоритм функционирования программной части системы управления содержит часть кода, которая изменяет управляемые величины в соответствии с заранее заданной функцией времени.

Контур регулирования в общем случае состоит из объекта регулирования с передаточной функцией $W_{об}(p) = W_{об1}(p) \cdot W_{об2}(p)$, регулятора $W_{рег}(p)$ и цепи обратной связи $W_{ос}(p)$. В контуре регулирования действует управляющее (задающее) воздействие (задание) и возмущающее воздействие (возмущение). Управляющее воздействие замкнутый контур должен воспроизводить, а возмущающее воздействие подавлять [4, 10].

Передаточная функция разомкнутого в любом месте (например, в т. а) контура регулирования

$$W_p(p) = W_{рег}(p) \cdot W_{об1}(p) \cdot W_{об2}(p) \cdot W_{ос}(p).$$

Обратим внимание на то обстоятельство, что в системах регулирования с единичной обратной связью $W_{ос}(p) = 1$, и тогда $y_{ос}(t) = y(t)$, а ошибка обратной связи $\Delta_{ос}(t)$ является ошибкой регулирования $\Delta y(t)$ координаты y . В практических системах регулирования часто $W_{ос}(p) \neq 1$, тогда $y_{ос}(p) = W_{ос}(p) \cdot y(p)$, и в результате координаты $y_{ос}$ и уни в динамических, ни в установившихся режимах не равны друг другу, а ошибка $\Delta_{ос}$ не является ошибкой регулирования координаты y . В статическом режиме при $p = 0$ в общем случае $W_{ос}(p) = k_{ос}$ и тогда $\Delta_{ос} = k_{ос} \cdot \Delta y$, т. е. ошибки разнятся численно, но относительные значения ошибок для координаты $y_{ос}$ и будут равны $\Delta_{ос} / y_{ос.зад} = \Delta y / y_{зад}$.

Передаточная функция разомкнутого контура по управлению (прямого канала) для регулируемой координаты y

$$W_{p.y}(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = W_{рег}(p) \cdot W_{об1}(p) \cdot W_{об2}(p),$$

и тогда

$$y(p) = W_{p.y}(p) \cdot x(p).$$

Передаточная функция является передаточной функцией разомкнутого контура по управлению для координаты обратной связи $y_{ос}$

$$W_{p.y}^*(p) = \frac{y_{ос}(p)}{x(p)} = W_p(p),$$

и тогда

$$y_{ос}(p) = W_{p.y}^*(p) \cdot x(p).$$

В зависимости от свойств объекта и регулятора замкнутый контур как система регулирования может обладать астатизмом того или иного порядка. При нулевом порядке астатизма система регулирования называется

статической. Порядок астатизма системы определяется отдельно по отношению к управляющему и возмущающему воздействию. Наиболее просто можно определить порядок астатизма системы по отношению к управляющему воздействию для случая единичной обратной связи (для координаты y_{oc} в общем случае). В этом случае все определяется видом передаточной функции разомкнутой системы. Пусть передаточную функцию разомкнутого контура регулирования можно представить в виде

$$W_p(p) = \frac{B(p)}{p^k \cdot [a_n \cdot p^{n-k} + K + a_{k+1} \cdot p + a_k]},$$

тогда k и есть порядок астатизма контура регулирования относительно управляющего воздействия для координаты y_{oc} .

При $k=0$ получается статическая система, при $k=1$ (или $a_0=0$ оператора знаменателя) – астатизм первого порядка, при $k=2$ ($a_0=0, a_1=0$) – астатизм второго порядка и т. д.

Система регулирования называется статической по отношению к управляющему или возмущающему воздействию, если при соответствующем воздействии, стремящемся с течением времени к некоторому установившемуся значению, ошибка также стремится к постоянному значению, зависящему от величины этого воздействия. Таким образом, статическая система всегда характеризуется наличием установившейся ошибки. Установившаяся ошибка в астатической системе зависит от порядка астатизма и вида входного сигнала [4, 10].

3.2 Компенсация инерционности объекта в контуре регулирования

В современных системах автоматического регулирования широко применяется компенсация инерционности объекта для повышения точности и стабильности процесса управления. Инерционность объекта является одной из основных проблем, которую необходимо решить при проектировании систем регулирования. Она обусловлена тем, что объекты, с которыми приходится работать в системах управления, обладают определенной инерцией и не могут мгновенно изменять свое состояние в ответ на воздействие входного сигнала.

Инерция объекта может быть вызвана различными причинами, такими как физические ограничения (например, инерционность механизмов), задержки в передаче информации (например, в системах связи), а также внутренние процессы, происходящие в самом объекте управления. Все эти факторы приводят к тому, что процесс регулирования не может быть мгновенным, и требуется определенное время для достижения требуемого состояния или значения выходной переменной объекта управления [4, 10].

Компенсация инерционности объекта осуществляется путем введения

специальных элементов в контур регулирования, которые позволяют устранить или смягчить негативное влияние инерционности на процесс управления. Один из наиболее распространенных методов компенсации инерционности — это использование регуляторов с запаздыванием и адаптивными свойствами. Такие регуляторы способны учитывать инерционность объекта и динамически изменять свои параметры в зависимости от текущего состояния системы управления.

В контексте компенсации инерционности объекта также активно используются такие методы, как фильтрация сигналов, применение предиктивных алгоритмов, а также использование моделей объекта управления для оценки его динамики. Все эти подходы позволяют улучшить качество управления и уменьшить время переходных процессов.

Однако следует отметить, что компенсация инерционности объекта может также привести к некоторым нежелательным эффектам, таким как увеличение уязвимости системы к возмущениям или изменениям внешних условий. Поэтому при проектировании систем регулирования необходимо тщательно обдумывать и балансировать компенсацию инерционности с другими требованиями и ограничениями, включая устойчивость системы, быстродействие и достижение требуемой точности управления [4, 10].

Таким образом, компенсация инерционности объекта в контуре регулирования является важным аспектом проектирования систем автоматического управления. Она позволяет улучшить точность и стабильность процесса регулирования, однако требует тщательного анализа и балансировки с другими требованиями и ограничениями системы.

Основой для практического осуществления оптимизации контуров регулирования является компенсация больших инерционностей объекта в контуре регулирования. Звенья объекта регулирования чаще всего представляют собой инерционность 1-го порядка (апериодическое звено) с передаточной функцией вида

$$W_{об}(p) = k_{об} \cdot \frac{1}{1 + pT_{об}}.$$

Из-за наличия в объекте инерционных звеньев весь контур регулирования работает с инерцией. Если постоянная времени инерционного звена мала, то и влияние ее на быстродействие контура также не велико. Но большие постоянные времени отрицательно влияют на процесс регулирования, и следует добиваться их компенсации. Для такой компенсации необходимо иметь в контуре регулятор, передаточная функция которого содержала бы в числителе выражение $(1 + pT_p)$. Если добиться равенства постоянных времени $T_p = T_{об}$, то числитель и знаменатель передаточной функции контура будут одинаковыми и взаимно сократятся. Такой прием называют компенсацией инерционности первого порядка. Компенсация инерционности приводит к упрощению передаточной функции объекта и позволяет существенно повысить

быстродействие контура регулирования.

Передаточная функция П-регулятора имеет вид

$$W_{\Pi}(p) = \frac{-U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_{\text{ВХ}}} = k_p = k_{\Pi},$$

где $k_{\Pi} = k_p = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_{\text{ВХ}}}$ – коэффициент усиления пропорционального регулятора.

Пропорциональный регулятор – это устройство, которое используется для поддержания определенного значения параметра системы путем регулирования управляющего сигнала в пропорции к разнице между текущим и желаемым значением параметра.

Пропорциональный регулятор основан на принципе обратной связи, где управляющий сигнал регулируется в зависимости от отклонения измеряемого параметра от заданного значения. Чем больше отклонение, тем сильнее увеличивается или уменьшается управляющий сигнал.

Пропорциональный регулятор имеет коэффициент пропорциональности, который определяет, насколько сильно изменяется управляющий сигнал в ответ на отклонение. Чем выше коэффициент пропорциональности, тем быстрее достигается стабильное состояние системы, но при этом возможны колебания и перерегулирование. Низкий коэффициент пропорциональности может привести к медленной реакции на отклонение или даже отсутствию регулирования [4, 10].

Пропорциональные регуляторы широко применяются в различных сферах, включая промышленность, автоматизацию процессов и регулирование систем отопления и охлаждения. Они являются одним из базовых видов регуляторов и обеспечивают устойчивость и точность регулирования параметров системы.

Однако, пропорциональный регулятор может иметь ограниченные возможности при регулировании систем с нелинейной динамикой или при необходимости учета временных задержек. В таких случаях может потребоваться применение других видов регуляторов, таких как дифференциальный или интегральный регуляторы, или комбинация различных видов для обеспечения оптимального регулирования.

П-регулятор относится к регуляторам с очень большим быстродействием. На скачкообразный сигнал на входе он реагирует таким же скачкообразным сигналом на выходе. Его временные и частотные характеристики ограничиваются только характеристиками ОУ и внешней коррекцией. Так, при подключении дополнительного внешнего корректирующего конденсатора C_k передаточная функция регулятора принимает вид

$$W(p) = \frac{k_p}{T_p p + 1},$$

где $k_p = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}$, $T_p = R_{\text{ОС}} \cdot C_k$, что соответствует апериодическому звену первого порядка.

Для исключения насыщения ПИ-регулятора входные напряжения не должны превышать значения

$$|U_{\text{вх}}| \leq \left| \frac{U_{\text{нас}}}{k_p} \right|,$$

где $U_{\text{нас}}$ – напряжение насыщения регулятора, В.

Упреждение, характерное для ПИ-регулятора, может быть использовано для компенсации инерционности объекта. Общая передаточная функция последовательно включенных инерционного звена 1-го порядка и ПИ-регулятора имеет вид:

$$W_{\text{общ}}(p) = k_{\text{рег}} \cdot k_{\text{об}} \cdot \frac{(1 + pT_{\text{из}})}{(1 + pT_{\text{об}})} \cdot \frac{1}{pT_{\text{из}}}.$$

Таким образом, инерционность 1-го порядка компенсируется упреждением регулятора и объект приобретает интегрирующие свойства, что благоприятно сказывается на процессе регулирования в замкнутом контуре.

Если время изодрома $T_{\text{из}}$ и постоянная времени инерционного звена $T_{\text{об}}$ не равны, то выражение в скобках также зависит от отношения постоянных, как и в случае с ПД-регулятором, но общие интегрирующие свойства рассматриваемой цепочки остаются. В этом заключается достоинство приема компенсации инерционности 1-го порядка с помощью последовательного включения ПИ-регулятора.

При необходимости компенсировать не одну, а две инерционности 1-го порядка, используется ПИД-регулятор, время изодрома которого $T_{\text{из}}$ компенсирует большую, а время упреждения $T_{\text{уп}}$ – меньшую из двух компенсируемых постоянных времени объекта.

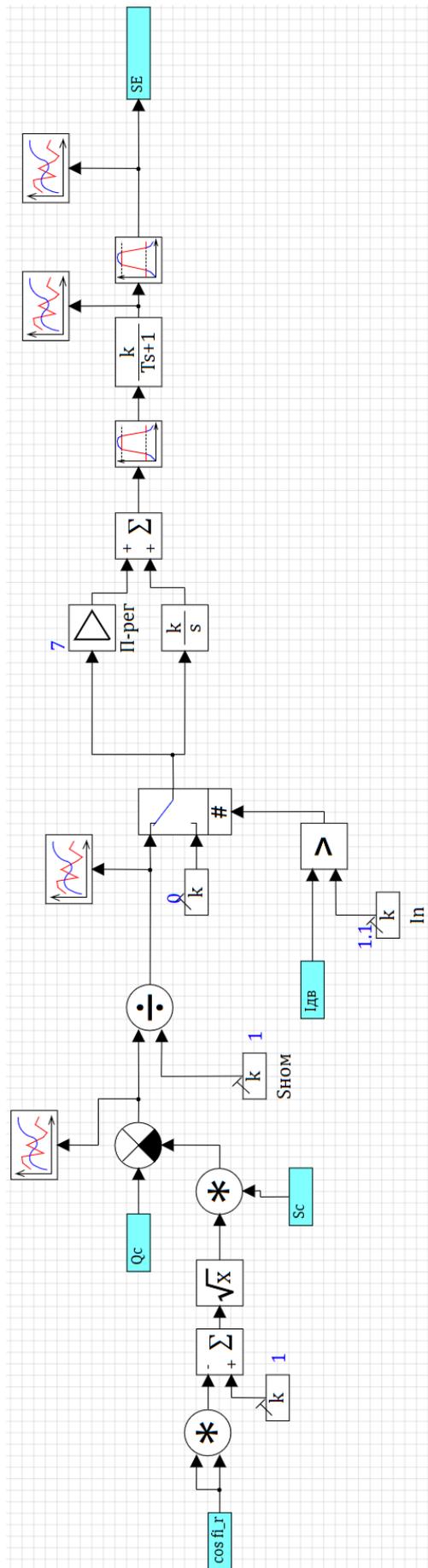


Рисунок 21 – Модель регулятора в SiminTech

3.3 Моделирование участка электрической сети с регулированием синхронных машин

Для моделирования участка электрической сети необходимо учесть множество факторов. В первую очередь, следует учитывать параметры синхронных машин, такие как активная и реактивная мощности, напряжения, токи и момент инерции. Важно также учесть возможные переходные процессы при изменении режимов работы синхронных машин.

Для оптимального регулирования синхронных машин могут использоваться различные методы и алгоритмы. Одним из таких методов является метод регулирования мощности по косинусу фазы. Этот метод позволяет поддерживать стабильные значения активной и реактивной мощностей синхронных машин [4, 10].

Также важным аспектом моделирования участка электрической сети является учет нагрузки. Нагрузка может быть как постоянной, так и изменяющейся во времени. Необходимо учитывать потери энергии во время передачи по линиям электропередачи и сопротивление проводов.

Для более точного моделирования участка электрической сети могут использоваться специальные программные средства, такие как симуляторы электроэнергетических систем. Они позволяют проводить различные эксперименты и исследования, а также оптимизировать работу системы.

Моделирование участка электрической сети с оптимальным регулированием синхронных машин позволяет предсказывать и анализировать поведение системы при различных условиях и изменениях параметров. Такой подход позволяет снизить риски аварийных ситуаций, обеспечить стабильность энергосистемы и эффективное использование ресурсов [7-9].

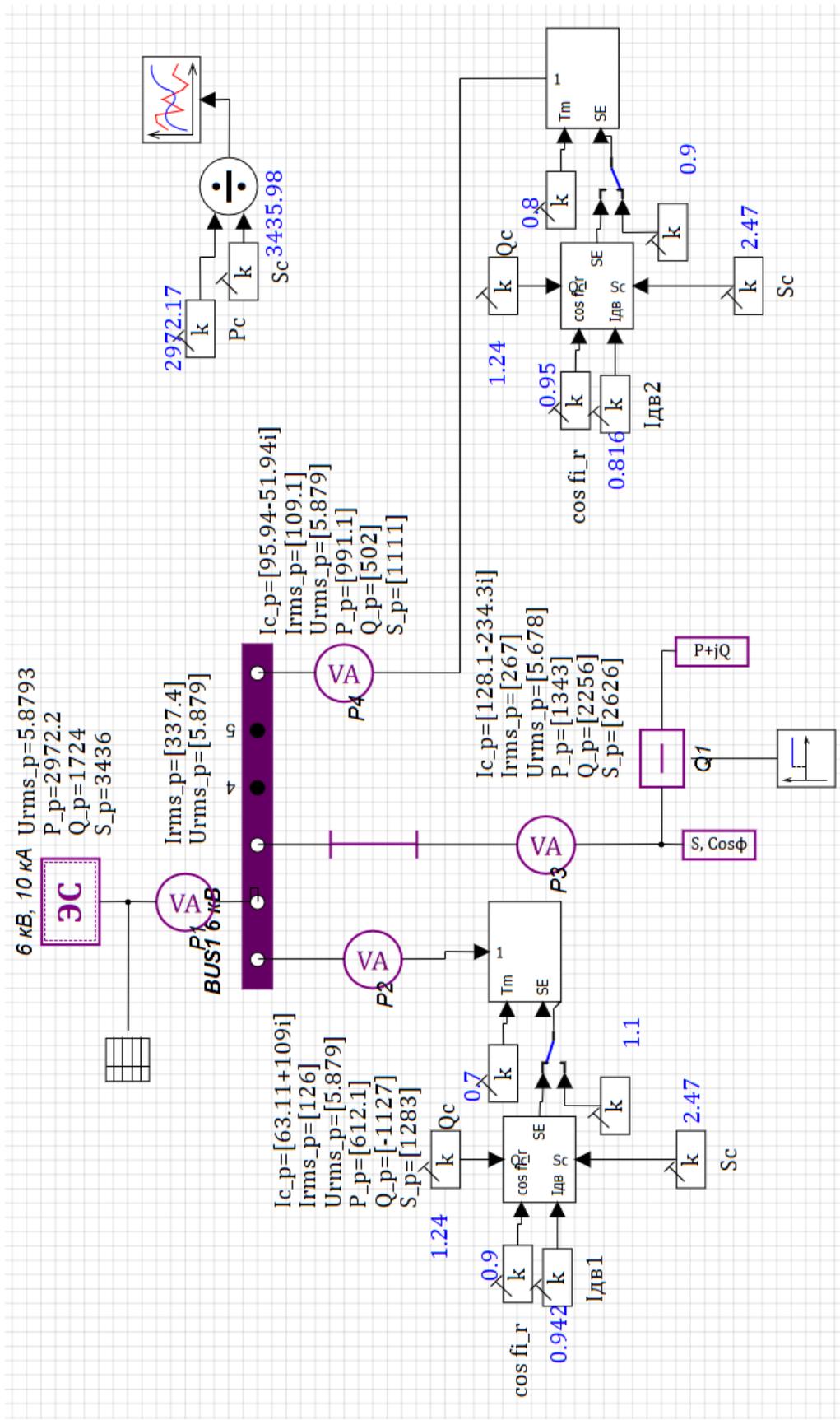


Рисунок 22 –Общий вид модели

```

1 | Pnom=1250 ;
- | Unom=6e3 ;
- | CosF=0.9;
- | fnom=50 ;
- | Nnom=3000;
- | var Sb,Ub,Ib, wb, Zb, Lb, wr_nom;
- | const sqrt3 = sqrt(3);
- | Sb = Pnom*1e3/CosF;
- | Ub = Unom;
10 | Ib = Sb/Ub/sqrt(3);
- | Zb = Ub^2/Sb;
- | wb = 2*pi*fnom;
- | Lb = Zb/wb;
- | wr_nom = Nnom/30*pi;
- | Ufnom=46;
- | Ifnom=253;
- |
- | //Xs_oe = submodel.Zs_oe[1];
- | R1_oe = 0.022835274;
20 | Xd_oe = 1.37;
- | Xdd_oe = 0.2;
- | ///Xddd_oe = submodel.XXd_oe[3];
- | Xq_oe = 1.37;
- | //Xqqq_oe = submodel.XXq_oe[2];
- | Tdd0 = 0.5;
- | //Tddd0 = submodel.Tdq0[2];
- | //Tqqq0 = submodel.Tdq0[3];
- | Xs_oe=0.12;
- | Xad_oe=Xd_oe-Xs_oe;
30 | Tf=0.367;
- | Rf=Ufnom/Ifnom;
- |
- | //Определение расчетных параметров
- | X1dd = xdd_oe*Zb;
- | L1dd = X1dd/wb;
- | R1 = R1_oe*Zb;
- | //U0im = 0;
- | //E1 = sqrt((Ug0+Ig0*xddd_oe*sinf0)^2+(Ig0*xddd_oe*submodel.cosf0)^2)*Unom;
40 | //U0re = E1;

```

Рисунок 23 – Программный код общей модели

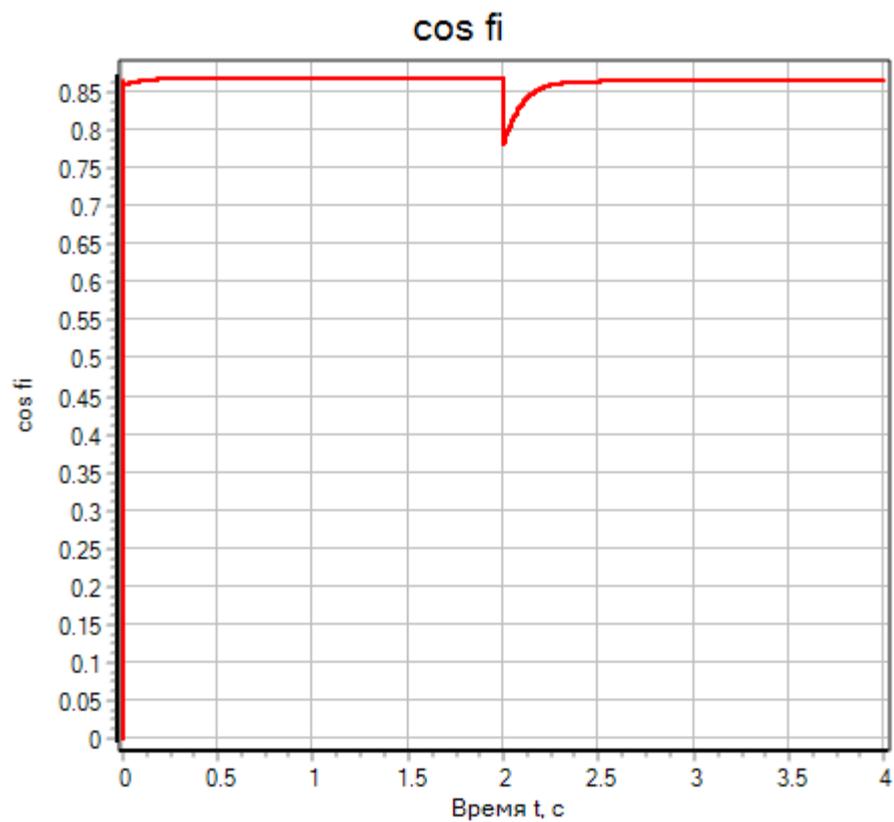


Рисунок 24 –График коэффициента мощности системы ($k = 7$)

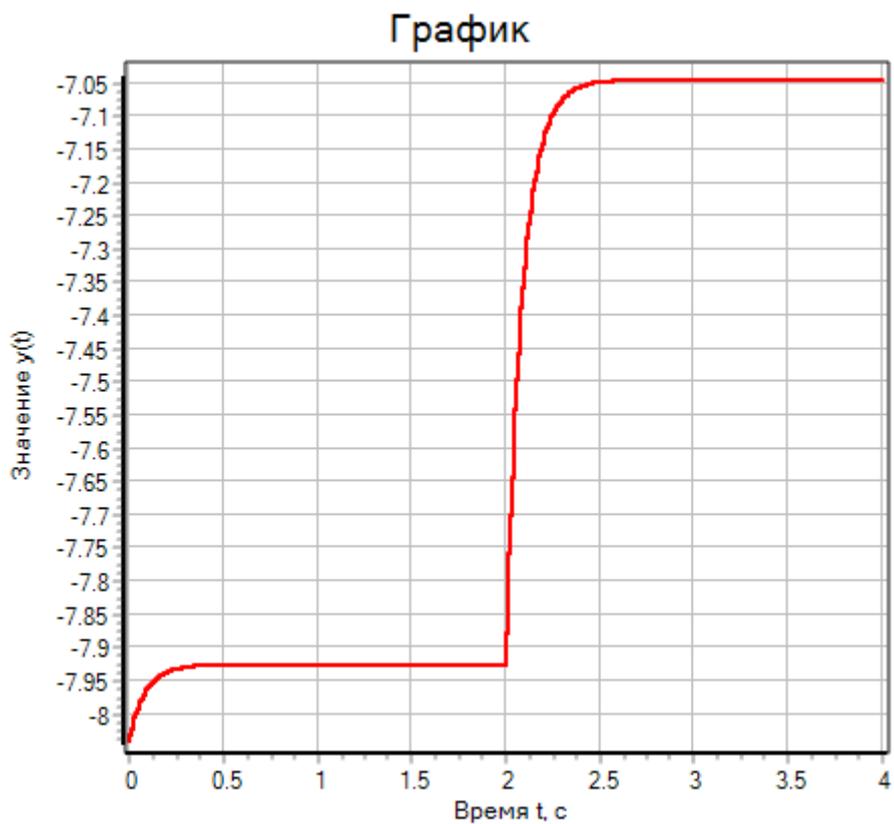


Рисунок 25 –Угол дельта группы двигателей($k = 7$)

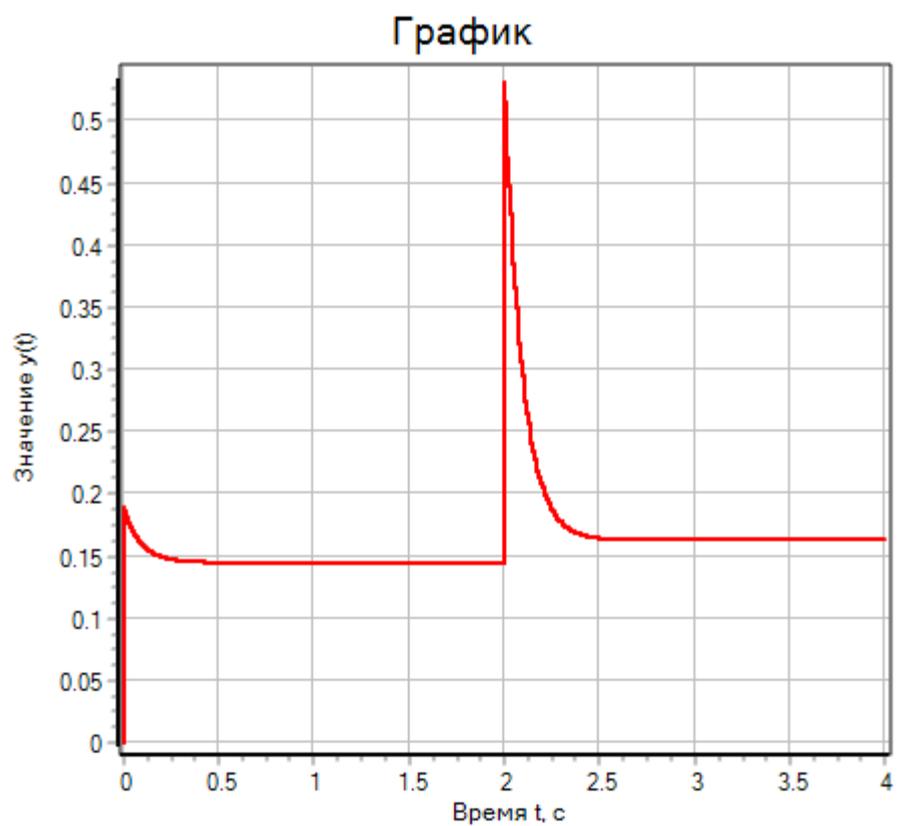


Рисунок 26 – Скольжение группы двигателей ($k = 7$)

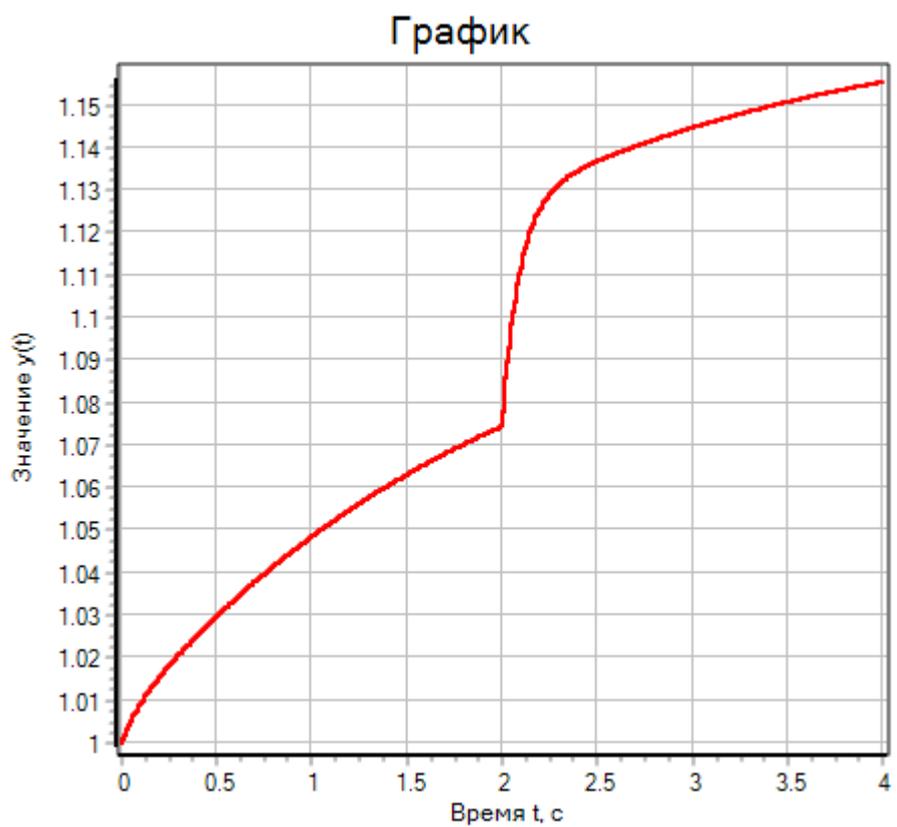


Рисунок 27 – Мощность группы двигателей ($k = 7$)

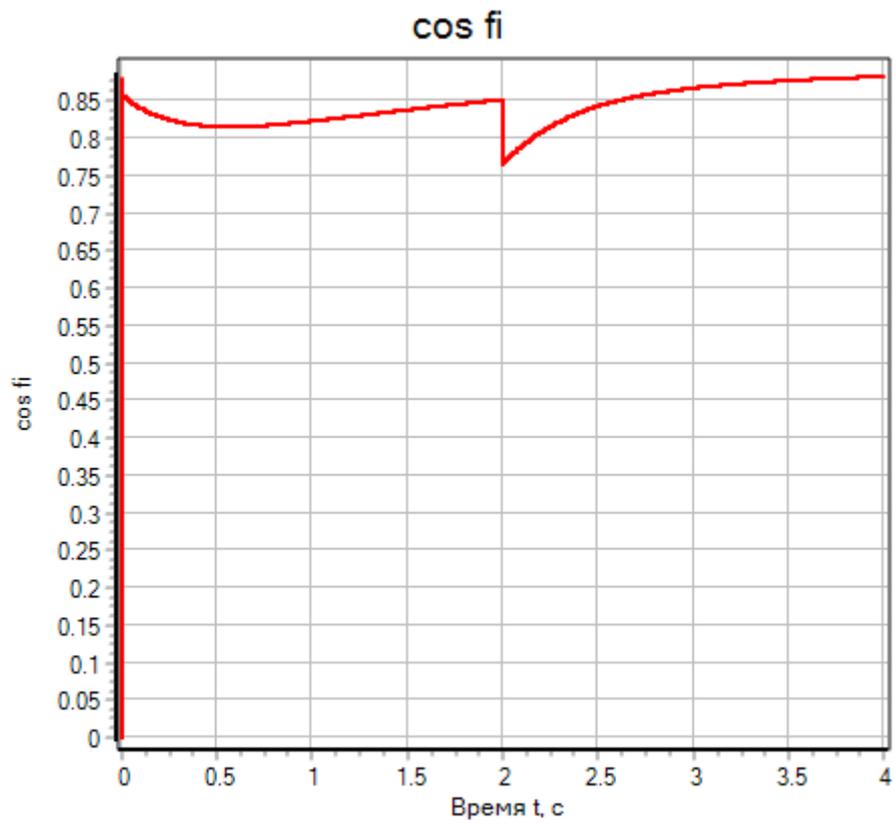


Рисунок 28 –График коэффициента мощности системы ($k = 2$)

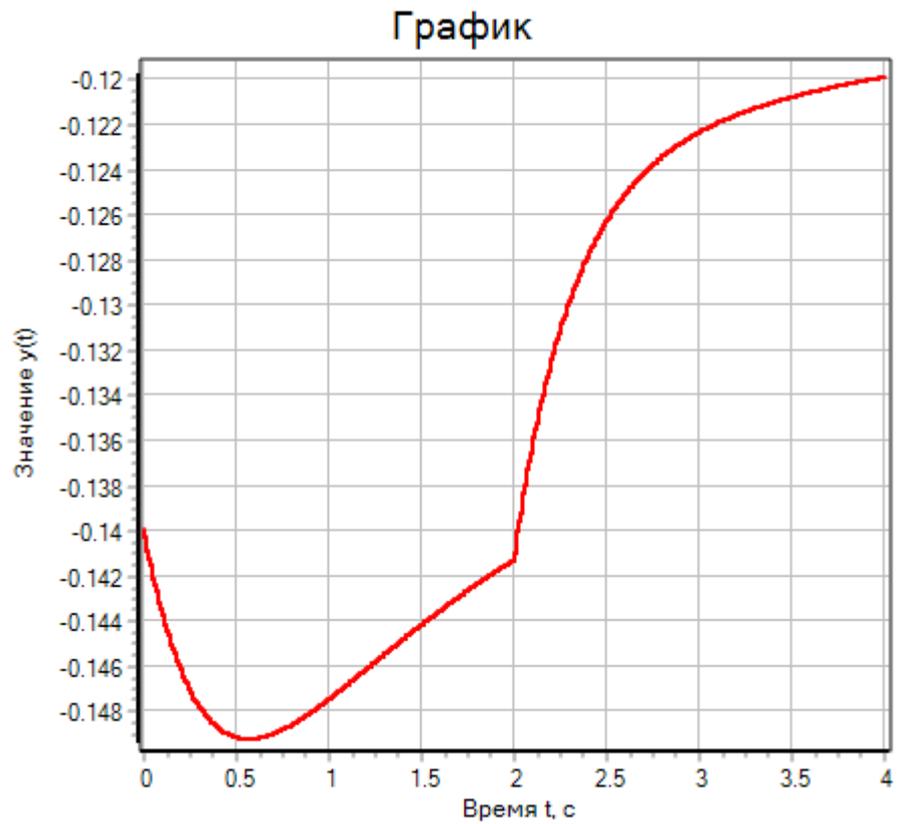


Рисунок 29 –Угол дельта группы двигателей($k = 2$)

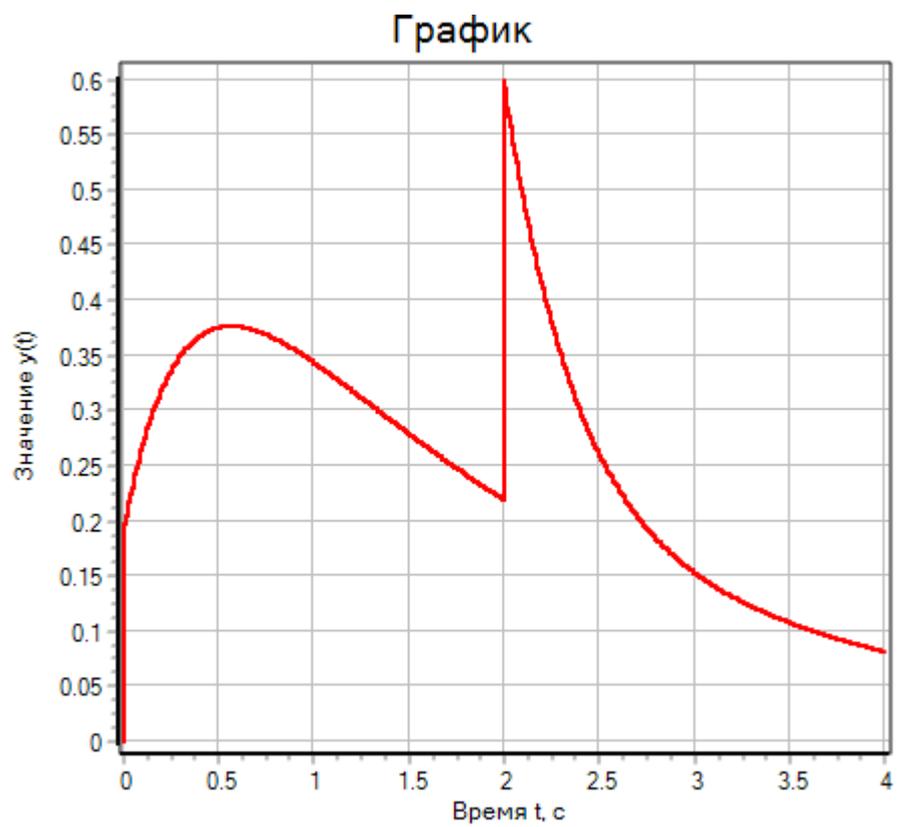


Рисунок 30 – Скольжение группы двигателей($k = 2$)

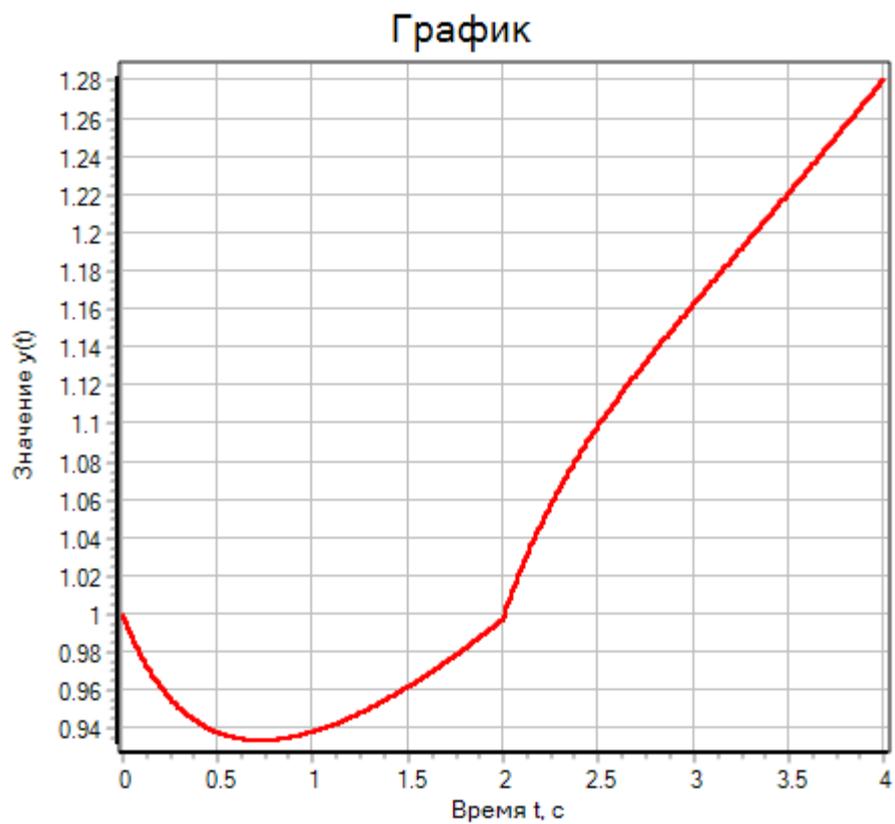


Рисунок 31 – Мощность группы двигателей($k = 2$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом магистерской диссертации является математическая и компьютерная модель по оптимизации потоков реактивной мощности на участке электрической сети. В результате выполнения работы сформулированы критерии оптимальности, на основе которых предложено описание группы синхронных двигателей как компенсаторов реактивной мощности в электроэнергетической системе.

В данной работе решены следующие задачи:

- Построение математического описания синхронной машины;
- Формализация требуемых параметров через системы уравнений Парка-Горева;
- Предложено упрощение системы уравнений Парка-Горева с учётом особенностей решаемой задачи;
- Проведено компьютерное моделирование участка электрической сети с регулированием синхронных машин;

Результаты моделирования показали, что стабилизация коэффициента мощности имеет множество преимуществ. Она повышает эффективность использования электроэнергии, снижает нагрузку на электрическую сеть, улучшает надежность работы оборудования и уменьшает потери энергии. Кроме того, она помогает сократить негативное влияние на окружающую среду, так как снижает потребление электроэнергии.

Система стабилизации коэффициента мощности электрической сети при использовании синхронных двигателей является важным инструментом для оптимизации работы электрических систем. Она позволяет поддерживать стабильный и оптимальный коэффициент мощности, что способствует повышению эффективности использования электроэнергии и снижению негативного влияния на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отделение, 1983. – 128 с.
2. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость / Пер. сангл. подред. Я.Н. Лучинского. – М.: Энергия, 1980. – 568 с.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Учеб. для энергет. спец. вузов. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
4. Глебов И.А., Логинов С.И. Системы возбуждения и регулирования синхронных двигателей. – Л.: Энергия, 1972. – 113 с.
5. Горев А.А. Переходные процессы синхронных машин. Госэнергоиздат, 1950. – 419 с.
6. Дипломное проектирование по специальности 140211.65 «Электроснабжение»: учеб. пособие / Л. Л. Латушкина, А. Д. Макаревич, А. С. Торопов, А. Н. Туликов ; Сиб. федер. ун-т, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан : Ред.-изд. сектор ХТИ – филиала СФУ, 2012. – 232 с.
7. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М.: Электроатомиздат, 1995. – 240 с.
8. Киреева, Э.А. Электроснабжение и электрооборудование цехов промышленных предприятий: Учебное пособие / Э.А. Киреева. - М.: КноРус, 2013. - 368 с.
9. Коробов, Г.В. Электроснабжение. Курсовое проектирование: Учебное пособие / Г.В. Коробов, В.В. Картавец, Н.А. Черемисинова. - СПб.: Лань, 2011. - 192 с.
10. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов. – СПб: Энергоатомиздат, 1994.
11. Конюхова, Е.А. Электроснабжение объектов: Учебное пособие для среднего профессионального образования / Е.А. Конюхова. - М.: ИЦ Академия, 2013. – 320 с.
12. Кудрин, Б.И. Электроснабжение: Учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / Б.И. Кудрин. - М.: ИЦ Академия, 2012. - 352 с.
13. Мукаев, А. И. Управление энергосбережением и повышение энергетической эффективности в организациях и учреждениях бюджетной сферы : Практическое пособие / А.И. Мукаев – Фаменское: ИПК ТЭК, 2011. – 212 с.
14. НТП ЭПП-94. Нормы технологического проектирования. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. М.: АО ОТК ЗВНИ ПКТИ Тяжпромэлектропроект, 1994 (1-я редакция). – 78 с.

15. Пособие к «Указаниям по расчету электрических нагрузок». - М.: Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский институт Тяжпромэлектропроект, 1993 (2-я редакция). – 86 с.
16. Правила устройства электроустановок. - 7-е издание. - СПб.: Издательство ДЕАН, 2013. – 701 с.
17. РД 153-34.0-20.527-98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования; дата введ. 23.03.1998. – М.: Издательство МЭИ, 2013. – 131 с.
18. РТМ 36.18.32.4-92. Указания по расчету электрических нагрузок; дата введ. 01.01.1993. – М.: ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 2007. – 27 с.
19. СП 76.13330.2016 Электротехнические устройства. Актуализированная редакция СНиП 3.05.06-85.
20. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. т 2. Электрооборудование/Под общ. ред. А. А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 602 с.
21. Справочник электрика / Под ред. Э. А. Киреевой и С. А. Цырука. – М.: Колос, 2007. – 464 с.
22. Сибикин, Ю.Д. Электроснабжение: Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. - М.: РадиоСофт, 2013. – 328 с.
23. Хромченко, Г. Е. Проектирование кабельных сетей и проводок / Г. Е. Хромченко, П.И.Анастасиев, Е.З.Бранзбург, А.В.Коляда. - М.: Энергия, 2010.– 397 с.
24. Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 12-е изд., стер. – М.: Издательство МЭИ, 2012. –966 с.
25. Электротехнический справочник : в 4 т. Т. 4. Использование электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. (гл. ред. А. И. Попов). – 11-е изд., стер. – М. : Издательство МЭИ, 2014. – 704 с.
26. Электротехнический справочник: в 3-х т. Т. 2. Электротехнические устройства/Под. общ. ред. Проф. МЭИ В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоиздат, 2011. – 658 с.: ил.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Электроэнергетики

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В. И. Пантелеев
инициалы, фамилия
« 19 » декабря 2023 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Автоматическая стабилизация коэффициента мощности участка
электрической сети при использовании синхронных машин

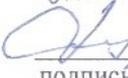
тема

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код и наименование направления

13.04.02.09 «Автоматизация энергетических систем»

код и наименование магистерской программы

Руководитель	 18.12.23 подпись, дата	доц. каф ЭМиАТ, к.т.н должность, ученая степень	А. В. Коловский инициалы, фамилия
Выпускник	 18.12.2023 подпись, дата		В.Ю. Кузьменко инициалы, фамилия
Рецензент	 18.12.23 подпись, дата	проф. ЦТид ХГУ, д.т.н. должность, ученая степень	А.С. Дулесов инициалы, фамилия
Нормоконтролер	 18.12.23 подпись, дата	доц. каф ЭМиАТ, к.т.н должность, ученая степень	А. В. Коловский инициалы, фамилия

Абакан 2023