

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт **Энергетический (ЭНИН)**

Направление подготовки **13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника**

Кафедра **Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)**

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Технико-экономическая оценка привлечения синхронных двигателей предприятий к генерации реактивной мощности</b>

УДК 621.313.323-8:658.26

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5E	Давыдов Денис Юрьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Кабышев А.В.	д.ф.-м.н., профессор		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бородин Ю.В.	к.т.н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроснабжение промышленных предприятий	Сурков М.А.	к.т.н., доцент		

## Запланированные результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт **Энергетический (ЭНИН)**  
Направление подготовки **13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника**  
Кафедра **Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)**

УТВЕРЖДАЮ:  
И. о. зав. кафедрой ЭПП  
\_\_\_\_\_ Сурков М.А.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

**магистерской диссертации**

Студенту:

Группа	ФИО
5AM5E	Давыдов Денис Юрьевич

Тема работы:

**Технико-экономическая оценка привлечения синхронных двигателей предприятий к генерации реактивной мощности**

Утверждена приказом директора (дата, номер)	13.02.2017 г. № 719/с
---	-----------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.05.2017 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

1. Генеральный план предприятия;
2. Список цехов с установленной мощностью и расчетной нагрузкой 0,4 кВ;
3. Сведения об установленных трансформаторах, кабельных линиях внутривоздушной сети, воздушных линиях внешнего электроснабжения, установленных средств компенсации реактивной мощности на стороне 0,4 кВ;
4. Суточные графики ЭП 0,4 кВ и 6 кВ.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аналитический обзор литературы;</li> <li>2. Разработка моделей электродвигателей в Matlab Simulink;</li> <li>3. Техничко-экономическое сравнение асинхронных и синхронных двигателей;</li> <li>4. Техничко-экономическое сравнение использования СД и КБ для компенсации реактивной мощности;</li> <li>5. Оценка экономической эффективности привлечения СД для компенсации реактивной мощности;</li> <li>6. Моделирование режимов СЭС предприятия с оценкой влияния СД на статическую и динамическую устойчивость узла нагрузки и качество электроэнергии.</li> </ol>
--	--

<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Однолинейная схема системы электроснабжения предприятия.</li> </ol>
--	---

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова С.Н., доцент, к.э.н.
Социальная ответственность	Бородин Ю.В., доцент, к.т.н.
Раздел на английском языке	Матухин Д.Л., доцент, к.п.н.

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Reactive power sources and consumers in power-supply systems of industrial plants

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	13.02.2017
--	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Кабышев А.В.	д.ф.-м.н., профессор		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5E	Давыдов Денис Юрьевич		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 140 с., 48 рис., 54 табл., 39 источников, 2 прил.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, асинхронные двигатели, синхронные двигатели, компенсирующие устройства, технико-экономическое обоснование.

Объектом исследования является система электроснабжения объекта ООО «Норильский никель»

Цель работы – обоснование возможности привлечения синхронных двигателей предприятий для генерации реактивной мощности с целью поддержания качества электроэнергии и снижения потерь мощности в сетях при обеспечении устойчивости узла нагрузки.

В процессе исследования использовались методы технико-экономического сравнения, математического и компьютерного моделирования, анализа экспериментальных данных.

В результате исследования разработана методика технико-экономического обоснования и оценки влияния синхронных двигателей используемых в системах электроснабжения промышленных предприятий на устойчивость и качество электроэнергии.

Область применения: предложенные в данной работе методики могут использоваться на этапах проектирования и реконструкции существующих систем электроснабжения с целью оценки эффективности мероприятий связанных с обеспечением компенсации реактивной мощности при наличии на предприятии синхронных электродвигателей.

## Обозначения и сокращения

ЭС – энергосистема;

ПС – подстанция;

СЭС – система электроснабжения;

АД – асинхронный двигатель;

СД – синхронный двигатель;

ИРМ – источник реактивной мощности;

КРМ – компенсация реактивной мощности;

КРУ – комплектное распределительное устройство;

РУ – распределительное устройство;

РМ – реактивная мощность;

КУ – конденсаторная установка;

ВКУ – высоковольтная конденсаторная установка;

КБ – конденсаторная батарея;

ВКБ – высоковольтная конденсаторная батарея;

НКБ – низковольтная конденсаторная батарея;

КЛ – кабельная линия;

ВЛ – воздушная линия;

ТП – трансформаторная подстанция;

КТП – комплектная трансформаторная подстанция;

ГПП – главная понизительная подстанция;

КЗ – короткое замыкание;

ЭП – электроприемник;

РПН – устройство регулирования под напряжением;

ПБВ – устройство переключения без возбуждения;

СХН – статическая характеристика нагрузки;

ДХН – динамическая характеристика нагрузки;

АПВ – автоматическое повторное включение;

РЗиА – устройства релейной защиты и автоматики.

## Оглавление

Введение .....	9
1. Источники и потребители реактивной мощности на промышленных предприятиях.....	12
1.1. Принцип компенсации реактивной мощности .....	14
1.2. Режимы работы асинхронных двигателей и их влияние на величину потребляемой реактивной мощности .....	17
1.3. Компенсирующая способность синхронных двигателей .....	22
1.4. Критерии привлечения синхронных двигателей для генерации реактивной мощности.....	24
1.5. Методика технико-экономического обоснования использования синхронных двигателей для генерации реактивной мощности.....	26
1.6. Проблемы применения некоторых источников реактивной мощности .....	29
2. Моделирование двигателей в Matlab Simulink .....	31
2.1. Модели асинхронных двигателей .....	31
2.2. Модели синхронных двигателей .....	32
3. Техничко-экономическое обоснование применения синхронных двигателей для генерации реактивной мощности .....	38
3.1. Расчет электрических нагрузок .....	38
3.2. Техничко-экономическое сравнение асинхронных и синхронных двигателей.....	41
3.3. Баланс реактивной мощности и определение располагаемой мощности синхронных двигателей .....	49
3.4. Расчет и сравнение приведенных затрат на компенсацию реактивной мощности синхронными двигателями и конденсаторными батареями 6 кВ .....	56
3.5. Уточнение баланса реактивной мощности и регулирование мощности по графику нагрузки.....	59
3.6. Оценка экономической эффективности привлечения синхронных двигателей к генерации реактивной мощности .....	61
4. Расчет режимов работы системы электроснабжения предприятия .....	62
4.1. Расчет параметров схем замещения.....	62
4.2. Статические характеристики нагрузки .....	66

4.3. Отклонения напряжения при нормальном и послеаварийном режимах.....	69
4.4. Определение запаса статической устойчивости.....	72
4.5. Исследование динамической устойчивости.....	75
4.6. Исследование влияния несинусоидальности напряжения на работу конденсаторных батарей и синхронные двигатели .....	81
Результаты проведенного исследования .....	86
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	88
Введение.....	89
5.1. Общая экономическая концепция технологических решений.....	90
5.2. Обоснование капитальных затрат и выбора синхронных двигателей.....	92
5.3. Расчет экономической эффективности.....	95
6. Социальная ответственность .....	98
Введение.....	100
6.1. Производственная безопасность .....	101
6.2. Анализ выявленных вредных факторов .....	102
6.2.1. Шум и вибрация.....	102
6.2.2. Микроклимат.....	104
6.2.3. Освещение .....	105
6.3. Анализ выявленных опасных факторов .....	106
6.3.1. Движущиеся машины и механизмы.....	106
6.3.2. Защита от поражения электрическим током.....	107
6.3.3. Расчет заземляющего устройства.....	108
6.4. Экологическая безопасность .....	112
6.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	113
6.6. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	116
Заключение .....	117
Список используемых источников.....	118
Приложение А .....	122
Приложение Б.....	125



## ВВЕДЕНИЕ

### Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В процессе проектирования и эксплуатации систем электроснабжения возникает необходимость принятия рациональных и экономически обоснованных технических решений по реализации мероприятий связанных компенсацией реактивной мощности. Одним из таких мероприятий является использование устройств, обеспечивающих выработку необходимой реактивной мощности по месту ее потребления (при наименьшем удалении от потребителей). В настоящее время на промышленных предприятиях для целей компенсации реактивной мощности широко используются конденсаторные установки и синхронные двигатели, способные работать в режиме генерации реактивной мощности. Конденсаторные батареи, являющиеся более экономичными и менее дорогими источниками реактивной мощности, как правило, более распространены на промышленных предприятиях, однако их использование не всегда может быть возможным по техническим причинам.

**Целью работы является** обоснование целесообразности применения синхронных двигателей для генерации реактивной мощности и поддержки устойчивости системы электроснабжения с учетом технических проблем применения альтернативных, более экономичных источников реактивной мощности, таких как конденсаторные батареи.

Для достижения цели были решены следующие **задачи:**

- обзор существующих методов оценки экономической целесообразности привлечения синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности;

- разработка методики технико-экономического сравнения вариантов использования синхронных и асинхронных электродвигателей совместно с конденсаторными батареями и определения оптимальной реактивной мощности генерируемой синхронными двигателями на примере существующей системы электроснабжения предприятия;

-рассмотрены вопросы повышения устойчивости систем электроснабжения с использованием синхронных двигателей;

-произведена оценка влияния высших гармоник на работу конденсаторных батарей и синхронные двигатели.

**Методы исследования.** В работе используются методы:

- технико-экономического сравнения;
- математического и компьютерного моделирования;
- анализа экспериментальных данных.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1) Разработан метод определения параметров режима работы электродвигателей, основанный на использовании компьютерных моделей.

2) Приведена методика технико-экономического сравнения вариантов использования синхронных двигателей и конденсаторных батарей на примере рассматриваемой системы электроснабжения предприятия.

3) Приведена методика оценки статической и динамической устойчивости системы электроснабжения.

4) Разработана компьютерная имитационная модель для оценки влияния высших гармоник на конденсаторные батареи и синхронные двигатели.

**Практическая значимость результатов работы:**

Предложенные методы технико-экономического сравнения имеют практическое применение для оценки экономической эффективности мероприятий по компенсации реактивной мощности на предприятиях располагающих синхронными двигателями, где по техническим причинам недопустимо использование более экономичных средств компенсации реактивной мощности.

## Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования.

**В первой главе** произведен литературный анализ и рассмотрены основные проблемы использования средств компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения предприятий.

**Во второй главе** приводится описание разработанных моделей асинхронных и синхронных двигателей в программном комплексе компьютерного моделирования Matlab Simulink. Приведены необходимые исходные данные для расчета схем замещения моделей, описан алгоритм и приведены графические схемы структуры моделей.

**В третьей главе** произведено непосредственно технико-экономическое обоснование и сравнение вариантов использования синхронных двигателей для генерации реактивной мощности. В данной главе сравниваются приведенные затраты на синхронные и асинхронные двигатели, используемые совместно с конденсаторными батареями, рассчитаны балансы мощности для различных вариантов.

**Четвертая глава** посвящена оценке влияния компенсации реактивной мощности синхронными двигателями и конденсаторными батареями на качество электроэнергии, устойчивость узла нагрузки, потери мощности и напряжения в нормальном и послеаварийном режимах. Исследовано влияние несинусоидальности напряжения на работу конденсаторных батарей и синхронных двигателей.

**В пятой главе** произведено оценочное сравнение вариантов технологических решений, рассчитаны и обоснованы капитальные затраты с учетом актуальных цен поставщиков оборудования, произведены расчеты критериев оценки экономической эффективности.

**В шестой главе** рассмотрены вопросы производственной безопасности и анализ вредных и опасных факторов характерных для рассматриваемого помещения, в котором эксплуатируются высоковольтные синхронные электродвигатели.

# 1 Источники и потребители реактивной мощности на промышленных предприятиях

Основными и наиболее крупными потребителями реактивной мощности в сетях промышленных предприятий являются асинхронные двигатели и силовые трансформаторы. Реактивная мощность, потребляемая асинхронными двигателями, составляет приблизительно 40% от ее общего потребления в промышленных электросетях. Часть реактивной мощности передаваемой электроприемникам потребляется элементами питающей сети в виде потерь. Около 35% всей потребляемой мощности приходится на потери в силовых трансформаторах и 7% в линиях электропередачи. Также потребителями реактивной мощности являются индукционные и дуговые печи (8%) и преобразовательные установки (10%) [3, с.68].

Увеличение потребления реактивной мощности вызывает увеличение тока в электрической сети и снижение коэффициента мощности. Загрузка реактивной мощностью линий электропередачи и силовых трансформаторов снижает их пропускную способность, вызывает необходимость увеличения сечения проводников, числа и мощности трансформаторов. Часть передаваемой реактивной мощности от генераторов электростанций теряется в электрической сети, этому также сопутствуют потери активной мощности и потери напряжения.

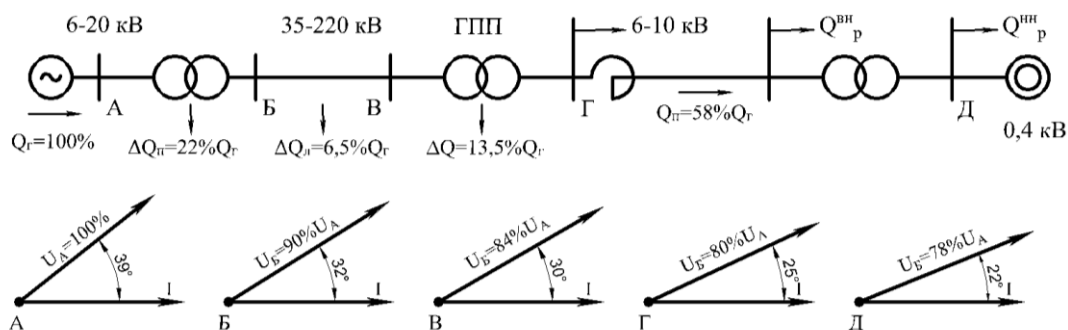


Рисунок 1.1 – Изменение потока реактивной мощности, напряжения и сдвига по фазе тока и напряжения при передаче от шин электростанции до шин приемной подстанции

Для устранения вышеперечисленных факторов, связанных с передачей по сетям реактивной мощности, необходимо обеспечивать выработку реактивной мощности непосредственно по месту ее потребления. В качестве источников реактивной мощности в системах электроснабжения предприятий могут использоваться синхронные машины, конденсаторные установки и специальные статические источники реактивной мощности, состоящие из нерегулируемых батарей конденсаторов и регулируемых реакторов.

Конденсаторные батареи являются наиболее экономичными ИРМ и могут работать только как генераторы реактивной мощности. Основным преимуществом, по сравнению с другими ИРМ, являются малые потери активной мощности на генерацию реактивной, которые составляют 0,0025-0,005 кВт/кВАр. В отличие от синхронных машин, они не имеют движущихся частей и более просты в эксплуатации и обслуживании. Основными недостатками КБ являются квадратичная зависимость величины реактивной мощности от напряжения и ступенчатый характер регулирования.

Синхронные двигатели изготавливаются, как правило, с опережающим коэффициентом мощности и в зависимости от тока возбуждения могут потреблять (при недовозбуждении), генерировать реактивную мощность (при перевозбуждении) или работать с  $\cos\varphi = 1$  потребляя из сети только активную мощность. Способность СД работать в режиме выдачи и потребления РМ позволяет осуществлять плавное регулирование РМ и напряжения в узле, а наличие быстродействующего автоматического регулирования возбуждения позволяет снизить колебания напряжения в СЭС предприятия при наличии резкопеременной нагрузки. Также подключение синхронных машин к сети приводит к улучшению таких показателей качества электроэнергии как несимметрии и несинусоидальности напряжения, что объясняется уменьшением эквивалентного сопротивления обратной последовательности и сопротивлений на частотах гармоник.

Синхронные компенсаторы устроены аналогично СД и представляют собой двигатель облегченной конструкции, работающий в режиме холостого хода и предназначенный для целей компенсации реактивной мощности. СК в отличие от СД, имеют более широкие пределы регулирования и предназначены для стабилизации напряжения в точке подключения в пределах  $\pm 5\%$ , снижения потерь электроэнергии в сетях, увеличения пропускной способности и обеспечения устойчивости энергосистем. В СЭС предприятий используются в настоящее время очень редко, т.к. имеют большие по сравнению с остальными ИРМ потери активной мощности и следовательно большую удельную стоимость 1 МВАр вырабатываемой реактивной мощности.

### **1.1 Принцип компенсации реактивной мощности**

С целью повышения коэффициента мощности и снижения загрузки сети реактивной мощностью на промышленных предприятиях применяют поперечную компенсацию реактивной мощности. Отсутствие компенсации реактивной мощности приводит следующим последствиям:

- 1) Уменьшению пропускной способности трансформаторов и ЛЭП вследствие увеличения реактивной нагрузки;
- 2) Увеличение полной мощности при снижении  $\cos \varphi$  приводит к возрастанию тока и, следовательно, к потерям мощности пропорциональным квадрату тока;
- 3) Увеличение тока требует повышения сечений проводов и кабелей, вследствие чего растут капитальные затраты на электрические сети;
- 4) Увеличение тока при снижении  $\cos \varphi$  ведет к увеличению потерь напряжения во всех звеньях энергосистемы, что вызывает снижение напряжения у потребителей;

5) На промышленных предприятиях понижение напряжения нарушает нормальную работу электроприемников, что ведет к снижению производительности электроприемников, снижению светового потока ламп, уменьшению срока службы, уменьшению пропускной способности заводских электрических сетей и в итоге ухудшению качества продукции и увеличению платы за электроэнергию.

Компенсация реактивной мощности приводит к снижению токов в линиях электропередачи, вследствие снижения реактивной составляющей тока, снижается загрузка трансформаторов. Помимо этого, при снижении величины передаваемой реактивной мощности, снижаются потери напряжения, потери реактивной мощности и потери активной мощности, сопутствующие передаче реактивной мощности. Установка устройств поперечной компенсации позволяет увеличить напряжение в узле подключения и улучшить качество электроэнергии.

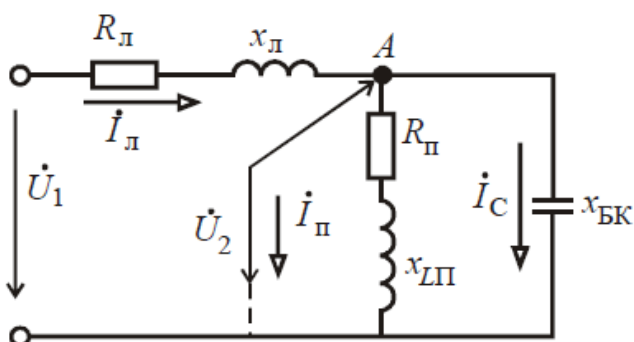


Рисунок 1.2 – Схема замещения цепи с активно-индуктивной нагрузкой и параллельно включенной емкостной нагрузкой

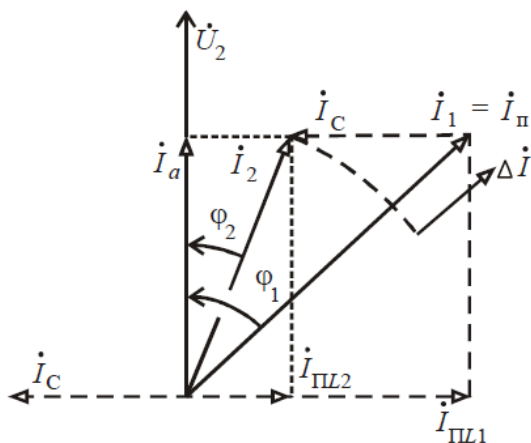


Рисунок 1.3 – Векторная диаграмма

На рисунке 1.3 изображена векторная диаграмма для цепи с поперечной компенсацией (рисунок 1.2). Видно, что при включении емкости параллельно нагрузке уменьшится угол  $\varphi$  и вследствие чего ток нагрузки приемника уменьшится от  $I_1$  до  $I_2$ , то есть произойдет разгрузка линии и генераторов.

Поток реактивной мощности снизится и уменьшатся потери активной и реактивной мощности, уменьшатся потери напряжения в сети.

$$\Delta U = \frac{P_{\text{нагр}}R + (Q_{\text{нагр}} - Q_{\text{ку}}) \cdot x}{U}$$

Потери активной мощности до компенсации

$$\Delta P_1 = \frac{P_{\text{нагр}}^2 + Q_{\text{нагр}}^2}{U^2} \cdot R$$

Потери активной мощности после компенсации

$$\Delta P_2 = \frac{P_{\text{нагр}}^2 + (Q_{\text{нагр}} - Q_{\text{ку}})^2}{U^2} \cdot R$$

Использование поперечной компенсации реактивной мощности позволяет снизить ток и уменьшить нагрузку элементов распределительной сети, что позволяет продлить их срок службы. Разгружая сеть от перетоков реактивной мощности, увеличивается пропускная способность сети и ее надежность. Компенсация реактивной мощности позволяет минимизировать оплату за потребляемую сверх нормативного значения реактивную энергию.

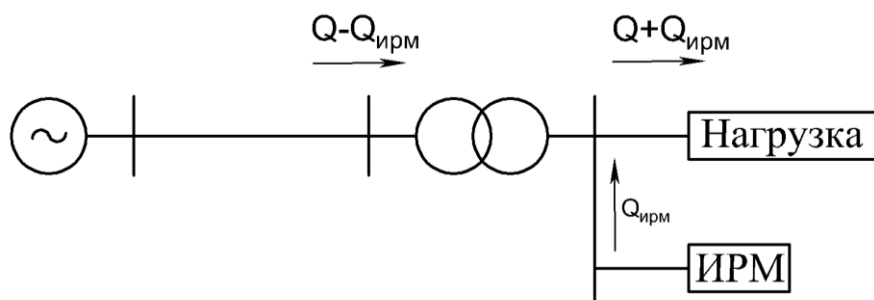


Рисунок 1.4 – Схема компенсации реактивной мощности



## 1.2 Режимы работы асинхронных двигателей и их влияние на величину потребляемой реактивной мощности

Величина потребляемой мощности асинхронными двигателями зависит от эксплуатационных, конструктивных факторов и их технического состояния. К эксплуатационным факторам относятся величина загрузки по активной мощности, уровень напряжения и частоты питающей сети, отклонение которых от номинальных значений влияет на уровень потребления реактивной мощности.

Асинхронный двигатель можно представить в виде схемы замещения изображенной на рисунке 1.5

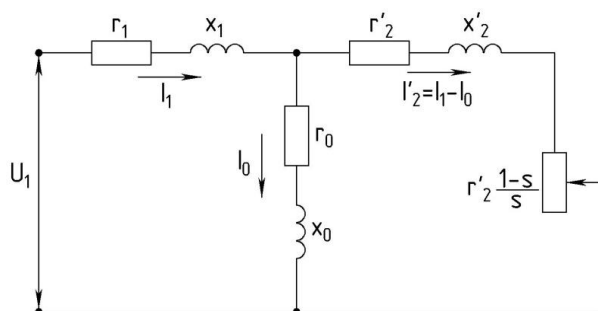


Рисунок 1.5 – Схема замещения асинхронного двигателя

Из данной схемы замещения можно определить величину реактивной мощности потребляемой асинхронным двигателем по формуле

$$Q_{\text{АД}} = 3 \cdot (I_1^2 x_1 + I_0^2 x_0 + I_2'^2 x_2') \approx 3 \cdot I_0^2 (x_1 + x_0) + 3 \cdot I_2'^2 (x_1 + x_2') = Q_0 + Q_p,$$

где  $I_0$  – ток холостого хода;

$I_2'$  – нагрузочный ток;

$Q_0$  – реактивная мощность холостого хода;

$Q_p$  – реактивная мощность рассеяния.

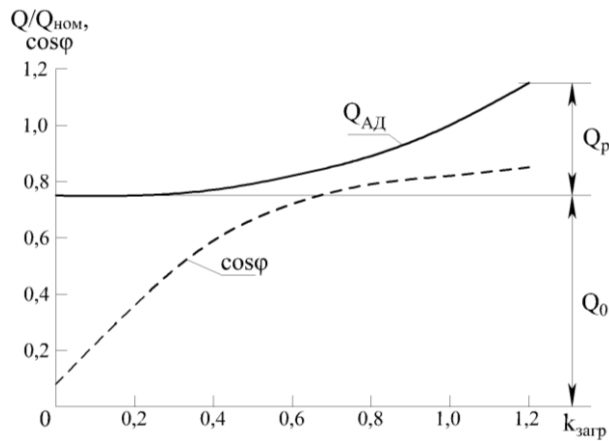


Рисунок 1.6 – Графики зависимости  $Q = f(k_{\text{загр}})$ ,  $\cos\varphi = f(k_{\text{загр}})$  для асинхронного двигателя

Как видно из рисунка общая потребляемая асинхронным двигателем реактивная мощность складывается из двух составляющих – реактивной мощности холостого хода  $Q_0$  и реактивной мощности рассеяния  $Q_p$ . Реактивная мощность рассеяния зависит от загрузки двигателя и уменьшается при снижении нагрузки на валу. Реактивная мощность холостого хода не зависит от загрузки. При холостом ходе двигателя потребление активной мощности минимально по сравнению с потребляемой реактивной мощностью холостого хода, следовательно, коэффициент мощности в этом режиме имеет минимальное значение.

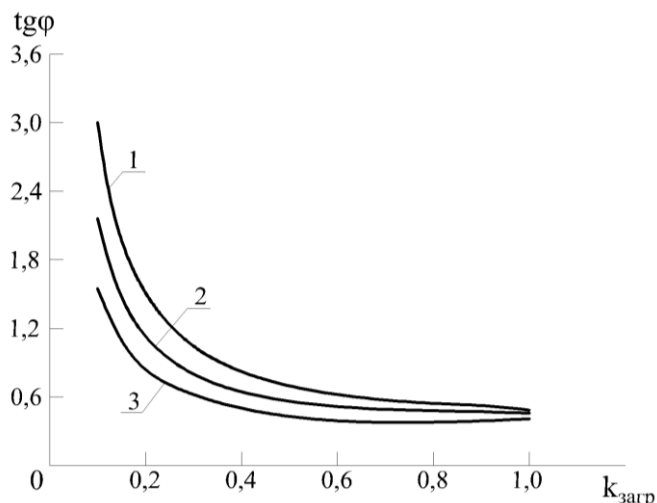


Рисунок 1.7 – Зависимость коэффициента реактивной мощности от загрузки асинхронных двигателей напряжением 6 кВ, синхронной частотой вращения  $n = 3000$  об/мин мощностью: 1 – 315-600 кВт, 2 – 1000-2000 кВт, 3 – 3000-5000 кВт

По графикам видно, что нагрузка асинхронных двигателей значительно влияет на потребление ими реактивной мощности. При уменьшении нагрузки от номинальной до холостого хода увеличивается коэффициент реактивной мощности, следовательно, относительное потребление реактивной мощности возрастает. Существенное увеличение коэффициента реактивной мощности наблюдается при нагрузке двигателей менее 40% номинальной мощности, а при снижении нагрузки ниже 20% происходит резкое увеличение  $\operatorname{tg}\varphi$  и потребляемой двигателями реактивной мощности. Также значение коэффициента реактивной мощности зависит от номинальной мощности двигателя. При увеличении номинальной мощности значение коэффициента реактивной мощности уменьшается, что обусловлено уменьшением относительной величины воздушного зазора у двигателей большей мощности, что в свою очередь влияет на величину потребляемой двигателем реактивной мощности.

Влияние отклонения питающего напряжения на величину потребляемой двигателем реактивной мощности и скольжения ротора изображено на рисунке 1.8.

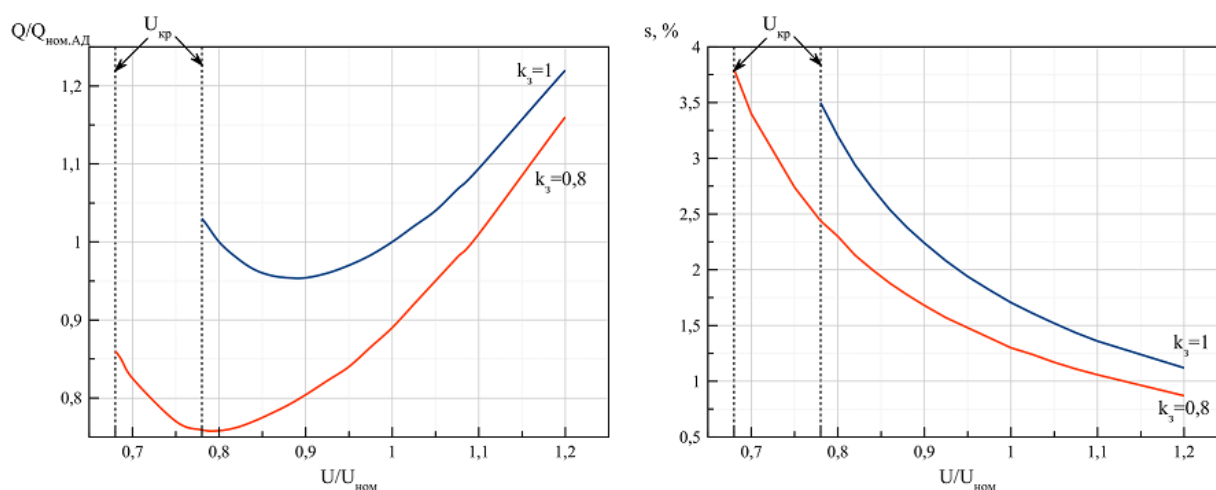


Рисунок 1.8 – Зависимости потребления реактивной мощности и величины скольжения АД при изменении питающего напряжения при различных коэффициентах загрузки

При некотором снижении напряжения ниже номинального реактивная мощность снижается, т.к. уменьшается реактивная мощность намагничивания. После достижения минимума, когда мощность намагничивания и рассеяния равны, при дальнейшем снижении напряжения величина потребляемой реактивной мощности начинает резко возрастать из-за возрастания потребления реактивной мощности рассеяния. При снижении напряжения сверх критического, нарушается устойчивая работа и двигатель останавливается. Величина критического напряжения и скольжения, как видно из графиков (рисунок 1.8), зависит от загрузки двигателя и при ее снижении уменьшается.

Потребление двигателем РМ зависит от конструктивного исполнения двигателя – типа ротора (короткозамкнутый, фазный, двойная беличья клетка), числа полюсов, типа корпуса (открытые и закрытые). Более высокий коэффициент мощности и КПД, при равном числе оборотов и номинальной мощности, имеют двигатели с КЗ ротором, чем двигатели с фазным ротором, т.к. ротор двигателей с фазным ротором выполняется с большим количеством проводников, что приводит к увеличению полей рассеяния и большему потреблению реактивной мощности. Следовательно, наличие двигателей с фазным ротором приводит к более существенному снижению коэффициента мощности в системе электроснабжения.

Таблица 1.1 – Зависимость номинального коэффициента мощности и КПД от частоты вращения (для двигателей А4, мощностью 400 кВт, напряжением 6кВ)

Синхронная частота вращения $n$ , об/мин	1500	1000	750	500
Коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}}$	0,868	0,862	0,82	0,78
КПД $\eta_{\text{кпд}}$	0,943	0,94	0,939	0,927

Согласно данным таблицы 1.1, взятым из справочника [8], для двигателей одинакового исполнения и номинальной мощности, двигатели с большим числом оборотов имеют больший коэффициент мощности и КПД, чем тихоходные двигатели. Это обусловлено тем, что быстроходные двигатели с меньшим числом полюсов, имеют меньшие геометрические размеры и сечение магнитопровода и как следствие меньший магнитный поток.

Помимо эксплуатационных и конструктивных факторов на величину потребляемой двигателем реактивной мощности оказывает влияние их техническое состояние. Потребление реактивной мощности двигателем может увеличиться вследствие увеличения воздушного зазора, причиной которого может быть износ подшипников или некачественный ремонт. Значительное увеличение реактивной мощности происходит после замены сгоревшей обмотки проводом другого сечения. Так при увеличении числа витков в фазе на 10% увеличение тока холостого хода и реактивной мощности может достигать 25% с учетом уменьшения магнитной проницаемости при насыщении.

### **1.3 Компенсирующая способность синхронных двигателей**

На многих промышленных предприятиях широкое применение в качестве приводов вентиляторных и компрессорных установок получили синхронные двигатели. В системе электроснабжения они являются одними из важнейших элементов, т.к. могут работать на опережающем токе, т.е. имеют возможность использоваться в качестве компенсирующих устройств.

При наличии на предприятии синхронных двигателей необходимо по возможности стремиться к их более полному использованию, хотя бы кратковременно в решающие периоды осенне-зимнего максимума или в послеаварийных режимах.

Несмотря на то, что при использовании для генерации реактивной мощности установленных на предприятии СД не надо производить дополнительные затраты на оборудование, для некоторых типов СД такое решение оказывается менее выгодным, чем установка дополнительной БК, вследствие больших потерь активной мощности в самом двигателе, либо по условиям статической устойчивости. Поэтому, необходимо определить какие именно синхронные двигатели будут участвовать в компенсации реактивной мощности, и какова должна быть их степень загрузки реактивным током.

Здесь возможны три варианта: полностью использовать располагаемую реактивную мощность двигателя, частично использовать реактивную мощность, не использовать для КРМ двигатель вообще.

Номинальная реактивная мощность с которой СД может длительно работать при номинальной нагрузке ( $\beta_{\text{СД}} = \frac{P}{P_{\text{СД}}} = 1$ ), номинальных значениях  $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$  и токе возбуждения  $i_{\text{В.НОМ}}$  и относительном значении напряжения на зажимах  $U_* = 0,95 \div 1,05$  определяется по выражению

$$Q_{\text{НОМ}}^{\text{СД}} = \frac{P_{\text{НОМ}}^{\text{СД}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}},$$

где  $P_{\text{НОМ}}^{\text{СД}}$ ,  $\text{tg}\varphi_{\text{НОМ}}$ ,  $\eta_{\text{НОМ}}$  - номинальная активная мощность, коэффициент реактивной мощности и к.п.д. СД.

При отклонении от номинальных условий работы максимальная (располагаемая) генерируемая реактивная мощность СД определяется по следующей формуле

$$Q_{\text{max}}^{\text{СД}} = \alpha_{\text{м}} \cdot Q_{\text{НОМ}}^{\text{СД}} = \alpha_{\text{м}} \cdot \frac{P_{\text{НОМ}}^{\text{СД}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}},$$

где  $\alpha_{\text{м}}$  - коэффициент перегрузки по реактивной мощности, зависящий от загрузки двигателя активной мощностью  $\beta_{\text{СД}}$ , подводимого напряжения  $U_*$  и технических характеристик двигателя, т.е.  $\alpha_{\text{м}} = f(\beta_{\text{СД}}, U_*)$ .

В литературе [11] приведена методика для расчета относительной реактивной мощности генерируемой СД при различных значениях загрузки по активной мощности и номинальном напряжении.

Согласно данной методике допустимая реактивная мощность может быть определена следующим условием

$$\alpha_{\text{min}}(y) \leq \alpha_{\text{доп}} \leq \alpha_{\text{пред}}, \alpha_{\text{max}},$$

где  $\alpha_{\text{min}}(y)$  - реактивная мощность потребляемая двигателем при минимально допустимом токе возбуждения;

$\alpha_{\text{пред}}$  - предельная генерируемая двигателем РМ в длительном режиме работы;

$\alpha_{\text{max}}$  - максимальное значение РМ СД при ограничении нагрева ротора.

## 1.4 Критерии привлечения синхронных двигателей для генерации реактивной мощности

Основным критерием для выбора рационального режима возбуждения СД и, соответственно, решения вопроса об использовании его располагаемой реактивной мощности являются дополнительные активные потери на генерацию реактивной мощности  $\Delta P_Q$ , которые могут быть определены по следующей расчетной формуле

$$\Delta P_Q = D_1 a + D_2 a^2 = D_1 \cdot \frac{Q_{СД}}{Q_{СДном}} + D_2 \cdot \frac{Q_{СД}^2}{Q_{СДном}^2}, \text{ кВт}$$

где  $a = \frac{Q_{СД}}{Q_{СДном}}$  - коэффициент загрузки СД по реактивной мощности;

$D_1$  и  $D_2$  - постоянные расчетные величины, определенные для СД при аппроксимации кривой второго порядка зависимости  $\Delta P = f(\alpha)$ , данные величины зависят от параметров конкретного двигателя и приводятся в справочной литературе [6].

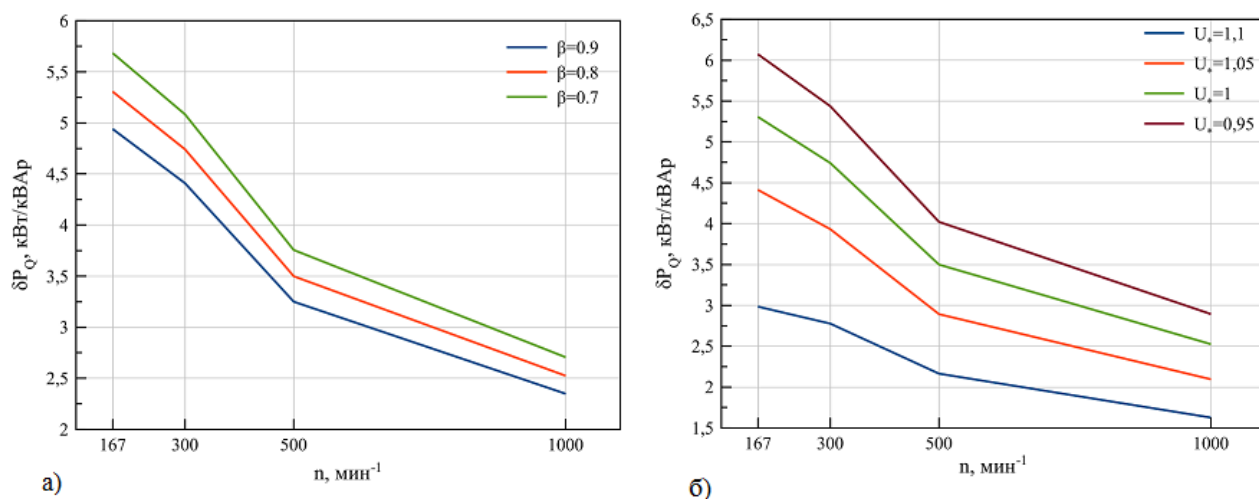


Рисунок 1.9 – Зависимости удельных потерь активной мощности на генерирование реактивной от частоты вращения двигателя при различных коэффициентах загрузки (а) и отклонениях напряжения (б)



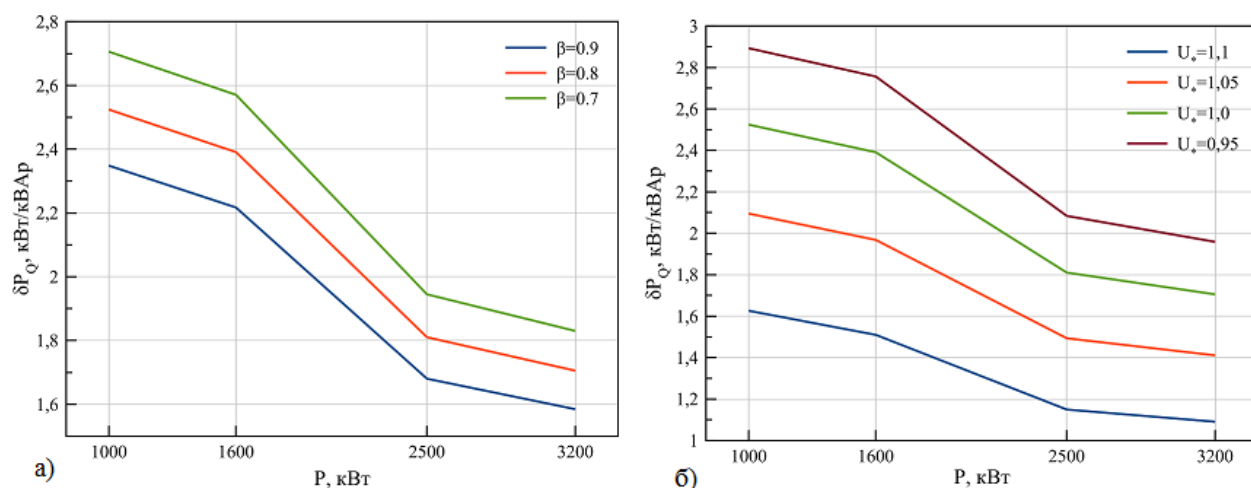


Рисунок 1.10 – Зависимости удельных потерь активной мощности на генерирование реактивной от мощности двигателя при различных коэффициентах загрузки (а) и отклонениях напряжения (б)

Относительные потери активной мощности зависят от технических параметров двигателей и от режима их работы. Согласно графикам при изменении напряжения на  $-5\%$  от номинального относительные потери увеличиваются в среднем в 1,15 раз, а при увеличении питающего напряжения на  $+10\%$  от номинального уменьшаются в среднем в 1,61 раз. При изменении коэффициента загрузки (в пределах от 0,9 до 0,7) значение  $\delta P$  изменяется приблизительно в 1,07 раз за шаг изменения коэффициента загрузки на 0,1. При снижении загрузки двигателя, как и при уменьшении питающего напряжения, наблюдается увеличение его компенсирующей способности. В целом, исходя приведенных графиков, можно сделать вывод, что наиболее предпочтительными для использования в целях компенсации реактивной мощности будут быстроходные синхронные двигатели достаточно большой мощности, так как для ее генерации происходит меньше потерь активной мощности. Не рекомендуется использование СД только для компенсации, так как при этом удельные потери активной мощности получаются весьма высокими, чем при использовании двигателя для привода рабочего механизма.

## 1.5 Методика технико-экономического обоснования использования синхронных двигателей для генерации реактивной мощности

Методика расчета целесообразности привлечения СД для генерации РМ сводится к определению и сравнению приведенных затрат при использовании располагаемой РМ СД (полном или частичном) и затрат на установку и эксплуатацию конденсаторных установок эквивалентной мощности. Решение об использовании синхронного двигателя или группы синхронных двигателей может быть принято при определении минимума затрат на КРМ.

Затраты на выработку реактивной мощности для конденсаторных установок и синхронных двигателей определяются по формулам

$$Z_{БК} = Z_{ОБК} + Z_{1БК} \cdot Q$$

$$Z_{СД} = Z_{ОСД} + Z_{1СД} \cdot Q + Z_{2СД} \cdot Q^2$$

где  $Z_{ОБК}$ ,  $Z_{ОСД}$  – постоянная составляющая затрат (не зависящая от реактивной мощности) на конденсаторные батареи и синхронные двигатели, у.е.;

$Z_{1БК}$  – удельные затраты на 1 кВАр вырабатываемой реактивной мощности для конденсаторных батарей, у.е./кВАр;

$Z_{1СД}$ ,  $Z_{2СД}$  – удельные затраты на 1 кВАр и 1 кВАр<sup>2</sup> вырабатываемой реактивной мощности синхронным двигателем, у.е./кВАр, у.е./кВАр<sup>2</sup>.

В постоянную составляющую входят затраты на регулирующие и защитные устройства, ячейки КРУ и кабельные линии.

$$Z_0 = E_p \cdot N \cdot K,$$

где  $E_p$  – суммарные ежегодные отчисления от стоимости оборудования;

$N$  – число двигателей или конденсаторных батарей;

$K$  – стоимость оборудования, у.е.

Удельные затраты на 1 кВАр реактивной мощности вырабатываемой конденсаторными батареями определяется по формуле

$$Z_{1БК} = E \cdot Z_{уд.БК} \left( \frac{U_{БК}}{U_{НОМ}} \right)^2 + C_0 \cdot \Delta P_{БК},$$

где  $E$  – суммарные ежегодные отчисления от стоимости конденсаторных батарей;

$Z_{уд.БК}$  – удельные затраты на установку конденсаторной батареи, у.е./кВАр;

$C_0$  – удельная стоимость потерь активной мощности в сети и конденсаторной батарее, у.е./кВт;

$\Delta P_{БК}$  – удельные потери активной мощности в конденсаторной батарее, кВт/кВАр;

$U_{БК}$  – фактическое напряжение на конденсаторной батарее, В.

Удельные затраты на 1 кВАр и 1 кВАр<sup>2</sup> реактивной мощности вырабатываемой синхронными двигателями определяется по формулам

$$Z_{1СД} = C_0 \cdot \frac{D_1}{Q_{НОМ}},$$

$$Z_{2СД} = C_0 \cdot \frac{D_2}{Q_{НОМ}^2 \cdot N}$$

при наличии в системе электроснабжения предустановленных синхронных двигателей генерирующих реактивную мощность

$$Z_{1СД} = C_0 \left( \frac{D_1}{Q_{НОМ}} + \frac{2D_2 \cdot Q_{пред}}{Q_{НОМ}^2 \cdot N} \right)$$

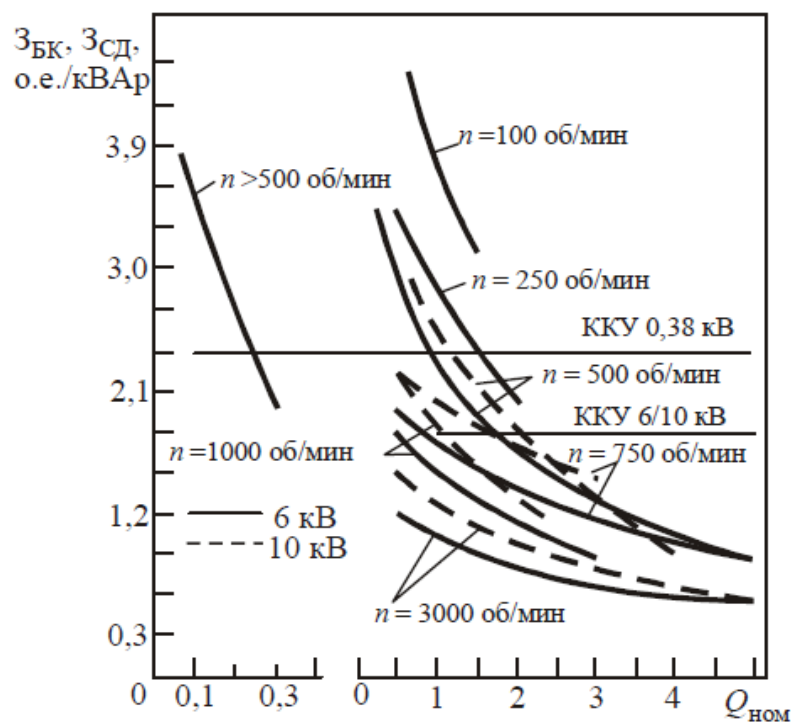


Рисунок 1.11 – Удельные затраты на генерацию реактивной мощности синхронными двигателями и конденсаторными установками

На рисунке 1.11 приведены зависимости удельных затрат на генерацию реактивной мощности от номинальной мощности различных типов компенсирующих устройств. Наиболее экономически выгодными являются в синхронные двигатели высокого напряжения с частотой вращения 3000 и 750 об/мин, удельные затраты которых меньше удельных затрат на конденсаторные установки сопоставимой мощности. Синхронные двигатели низкого напряжения и высокого напряжения частотой вращения ниже 250 об/мин имеют большие удельные потери активной мощности, использовать их для целей компенсации реактивной мощности менее выгодно, чем устанавливать дополнительные конденсаторные батареи. Однако, при использовании располагаемой мощности данных двигателей не более чем на 70-80% (для СД 6 кВ) и 40-60% (для СД 0,38 кВ) затраты на выработку реактивной мощности могут оказаться ниже, чем для конденсаторных батарей.

## 1.6 Проблемы применения некоторых источников реактивной мощности

Статические конденсаторы, наряду со своими достоинствами, имеют ряд недостатков. Во-первых, величина генерируемой реактивной мощности статических конденсаторов пропорциональна квадрату напряжения, что способствует снижению устойчивости системы электроснабжения, а при особо неблагоприятных условиях может привести к лавине напряжения.

$$Q_{c.k.} = U^2 \omega C, \text{ кВАр}$$

Во-вторых, регулирование реактивной мощности установок со статическими конденсаторами осуществляется дискретно, путем включения и отключения секций конденсаторов, что в случае неравномерности суточного графика может приводить к недокомпенсации или перекомпенсации. Для преодоления этого недостатка необходимо увеличивать число ступеней (уменьшая мощность ступени), но в этом случае будут увеличиваться капитальные затраты на установку переключателей и защитной и регулирующей аппаратуры.

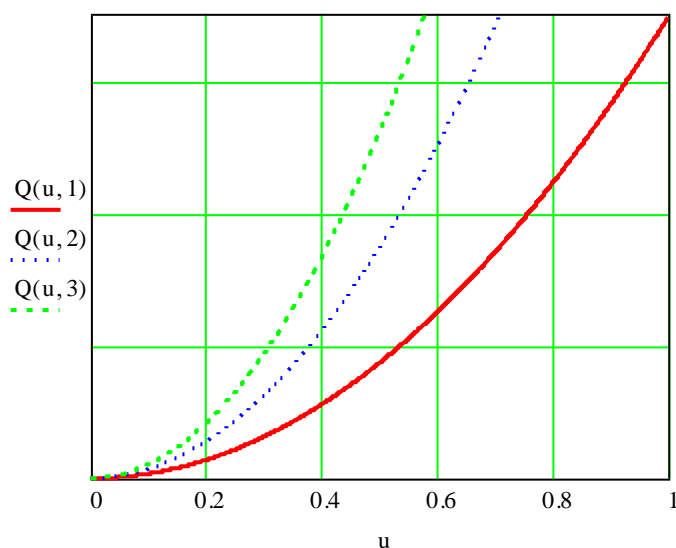


Рисунок 1.12 – Статические характеристики конденсаторной установки состоящей из трех секций

Еще одним недостатком статических конденсаторов является их перегрев вследствие повышения напряжения и при наличии в сети высших гармоник, что приводит к выходу конденсаторов из строя. Вследствие этого для того чтобы использовать батареи конденсаторов в сетях с несинусоидальностью напряжения, необходимо применять фильтры высших гармоник, что также приводит к удорожанию. Кроме того, конденсаторные батареи чувствительны к перенапряжениям и толчкам тока, поэтому КБ оборудованную выключателями (контакторами) не рекомендуется включать и выключать более 2-4 раз в сутки. Конденсаторные батареи могут быть пожароопасны (при использовании масляных конденсаторов) и иметь остаточный заряд при отключении, что повышает опасность при обслуживании.

Применение синхронных компенсаторов в сетях промышленных предприятий, как правило, нецелесообразно вследствие высоких удельных затрат на 1 кВАр генерируемой реактивной мощности, значительных потерь активной мощности и высокой стоимости. Однако использование данных устройств в сетях 6-10 кВ может быть оправдано при значительных реактивных нагрузках и резкопеременном характере нагрузки предприятия, т.к. в данном случае необходимо быстроедействие и плавность регулирования ИРМ которые являются достоинствами синхронных компенсаторов. Помимо высоких удельных потерь активной мощности, к недостаткам синхронных компенсаторов можно отнести усложнение и удорожание эксплуатации по сравнению со статическими конденсаторами.

Синхронные двигатели, как и синхронные компенсаторы, обладают достаточным быстроедействием и плавностью регулирования реактивной мощности. Их потери активной мощности на генерацию реактивной ниже, чем у синхронных компенсаторов, но значительно превышают потери конденсаторных батарей.

## 2 Моделирование двигателей в Matlab Simulink

Для удобства определения параметров режима работы двигателей, необходимых для дальнейшего расчета, создадим модели асинхронных и синхронных двигателей рассматриваемых в данной работе.

### 2.1 Модели асинхронных двигателей

Для моделирования асинхронных двигателей используем блок модели Asynchronous Machine pu Units. Каталожные данные моделируемых двигателей указаны в таблице 2.1 [6]

Таблица 2.1 – Каталожные данные асинхронных двигателей

Электродвигатель	$P_n$ , кВт	$n$ , об/мин	КПД	$\frac{\cos\varphi}{\text{tg}\varphi}$	$I_p / I_{ном}$ , о.е	$M_{max} / M_{ном}$ , о.е.	$M_p / M_{ном}$ , о.е.	$J$ , кг · м <sup>2</sup>
Асинхронный двигатель А4-400У-8УЗ	315	737	0,936	$\frac{0,82}{0,7}$	5,0	1,9	1,0	22
Асинхронный двигатель АТД2 АЗМ1-630/6000УХЛ4	630	2970	0,955	$\frac{0,9}{0,484}$	5,2	1,9	1,1	8,75

Таблица 2.2 – Параметры асинхронных двигателей

Электродвигатель	Конструкция ротора	Активное сопротивление статора $R_s$ , о.е.	Активное сопротивление ротора		Индуктивность статора $L_s$ , о.е.	Индуктивность ротора		Взаимная индуктивность $L_m$ , о.е.
			$R_{p1}$ , о.е.	$R_{p2}$ , о.е.		$L_{p1}$ , о.е.	$L_{p2}$ , о.е.	
Асинхронный двигатель А4-400У-8УЗ	КЗ ротор беличья клетка	0,0415	0,0135	-	0,07894	0,11	-	1,7
Асинхронный двигатель АТД2 АЗМ1-630/6000УХЛ4	КЗ ротор двойная беличья клетка	0,02735	0,009309	0,07758	0,08959	0,1674	0,08959	3,873

Параметры схемы замещения двигателя А4-400У-8УЗ вычислены по методике указанной в статье [7].

Параметры двигателя АТД2АЗМ1-630 рассчитаны с помощью встроенной программы для расчета параметров схемы замещения асинхронных двигателей с двойной беличьей клеткой (Simulink – power\_AsynchronousMachineParams).

## 2.2 Модели синхронных двигателей

Для моделирования синхронных двигателей используем блок модели Synchronous Machine pu Standard. Данный блок позволяет моделировать синхронную машину с заданием ее параметров в относительных единицах.

Паспортные данные моделируемых синхронных двигателей указаны в таблице 2.3 [6, с.83]. Значения продольных и поперечных индуктивных сопротивлений и постоянных времени двигателей определены по справочным данным [11, с. 235].

Активное сопротивление статора рассчитано по формуле

$$R_{ст} = 0,25 \cdot (1 - \eta_{ном}) \cdot \cos \varphi_{ном}$$

Таблица 2.3 – Параметры синхронных двигателей

Тип двигателя	Тип ротора	Номинальная мощность			$U_{ном}, В$	$n_{ном}, об/мин$	КПД, %	Активное сопротивление статора $R_{ст}, о.е.$	Реактивность рассеяния статора $X_{ст}, о.е.$	Продольные индуктивные сопротивления, о.е.			Поперечные индуктивные сопротивления, о.е.			Постоянные времени, с			
		$P_{ном}, кВт$	$Q_{ном}, кВАр$	$S_{ном}, кВА$						$x_d$	$x'_d$	$x''_d$	$x_q$	$x'_q$	$x''_q$	$\tau'_d$	$\tau''_d$	$\tau'_{q0}$	$\tau''_{q0}$
СТД 630-2	неволнолюсный	630	317,27	727,9	6000	3000	0,9617	0,0086	0,057	1,81	0,2273	0,1468	1,81	0,2273	0,1468	0,314	0,0392	2,51	0,07
СД 12-46-8	явнополюсный	320	165,4	380	6000	750	0,937	0,014	0,08255	1,547	0,175	0,125	0,821	-	0,134	0,616	0,00946	-	0,013



На рисунке 2.1 изображено окно ввода параметров блока модели синхронной машины. Во вкладке конфигурации выбирается тип конструкции ротора синхронной машины (Round – неявнополюсный, Salient-pole – явнополюсный). В верхней текстовой строке задается номинальная полная мощность, номинальное напряжение и частота (Nominal Power, Line-to-line voltage, frequency). В строке ниже записываются относительные значения индуктивных сопротивлений ( $X_d$  – продольное,  $X_d'$  – продольное переходное,  $X_d''$  – продольное сверхпереходное,  $X_q$  – поперечное,  $X_q'$  – поперечное переходное,  $X_q''$  – поперечное сверхпереходное,  $X_l$  – сопротивление рассеяния статора).

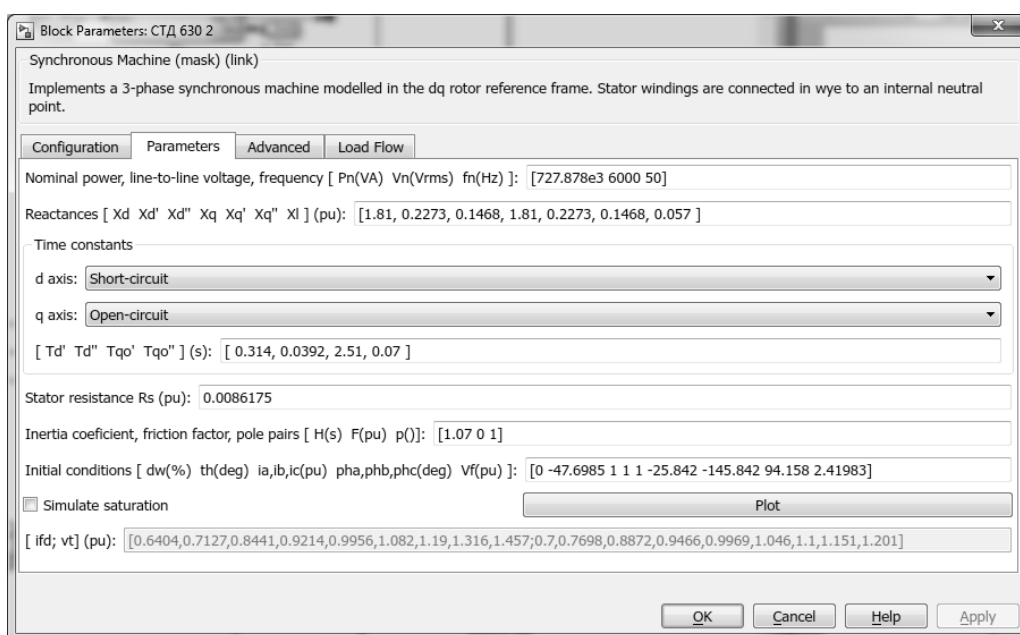


Рисунок 2.1 – Окно ввода параметров синхронной машины

В области Time Constants (постоянные времени) задаются значения постоянных времени синхронной машины, где  $T_d'/T_{d0}'$  – постоянная времени обмотки возбуждения при замкнутой/разомкнутой обмотке статора,  $T_d''/T_{d0}''$  – сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой/разомкнутой обмотке статора,  $T_q'/T_{q0}'$  – постоянная времени по поперечной оси при замкнутой/разомкнутой обмотке статора,  $T_q''/T_{q0}''$  – сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси при замкнутой/разомкнутой обмотке статора. Далее вводятся относительное значение активного сопротивления статора ( $R_s$ ), коэффициент инерции, коэффициент трения и число пар полюсов.

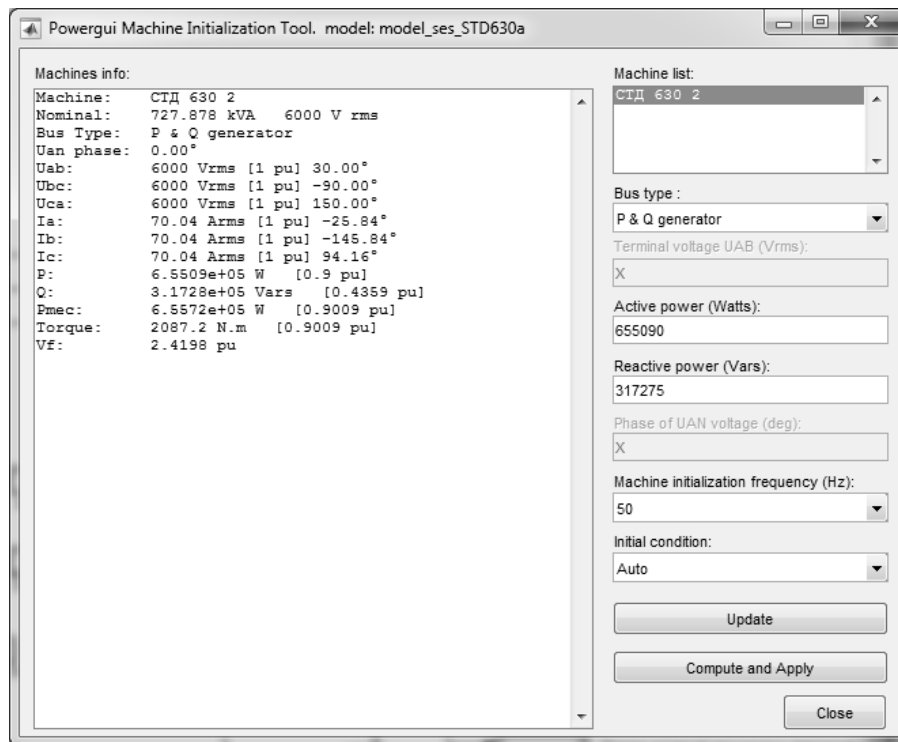


Рисунок 2.2 – Окно инструмента Powergui Machine Initialization

В текстовом поле Initial Conditions записываются параметры режима работы двигателя в начальный момент моделирования. В данной работе пуск двигателя не моделируется, предполагается, что двигатель в начальный момент времени моделирования работает в установившемся режиме с синхронной скоростью (отклонение  $d\omega\%=0$ ). Для этого, с помощью инструмента Powergui Machine Initialization (рисунок 2.2), вычисляются начальные значения угла нагрузки ( $\theta$ ), токов в фазах статора ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ), начальные фазы токов статора ( $\varphi_a$ ,  $\varphi_b$ ,  $\varphi_c$ ) и напряжение обмотки возбуждения ( $V_f$ ).

Согласно документации к модели, напряжение возбуждения  $V_f$  и ток возбуждения  $I_f$ , равны отношению модуля вектора ЭДС двигателя к вектору напряжению сети, т.е.  $V_f=I_f=1$  о.е. в случае равенства модулей вектора ЭДС и питающего напряжения. Определенное значение  $V_f$  и  $I_f$ , равное номинальному напряжению и току возбуждения, составляет 2,42 о.е. (для STD 630-2) и 2,133 о.е. (для СД 12-46-8).

На рисунке 3 показана схема модели синхронного двигателя с блоком возбуждения и блоком индикации параметров.

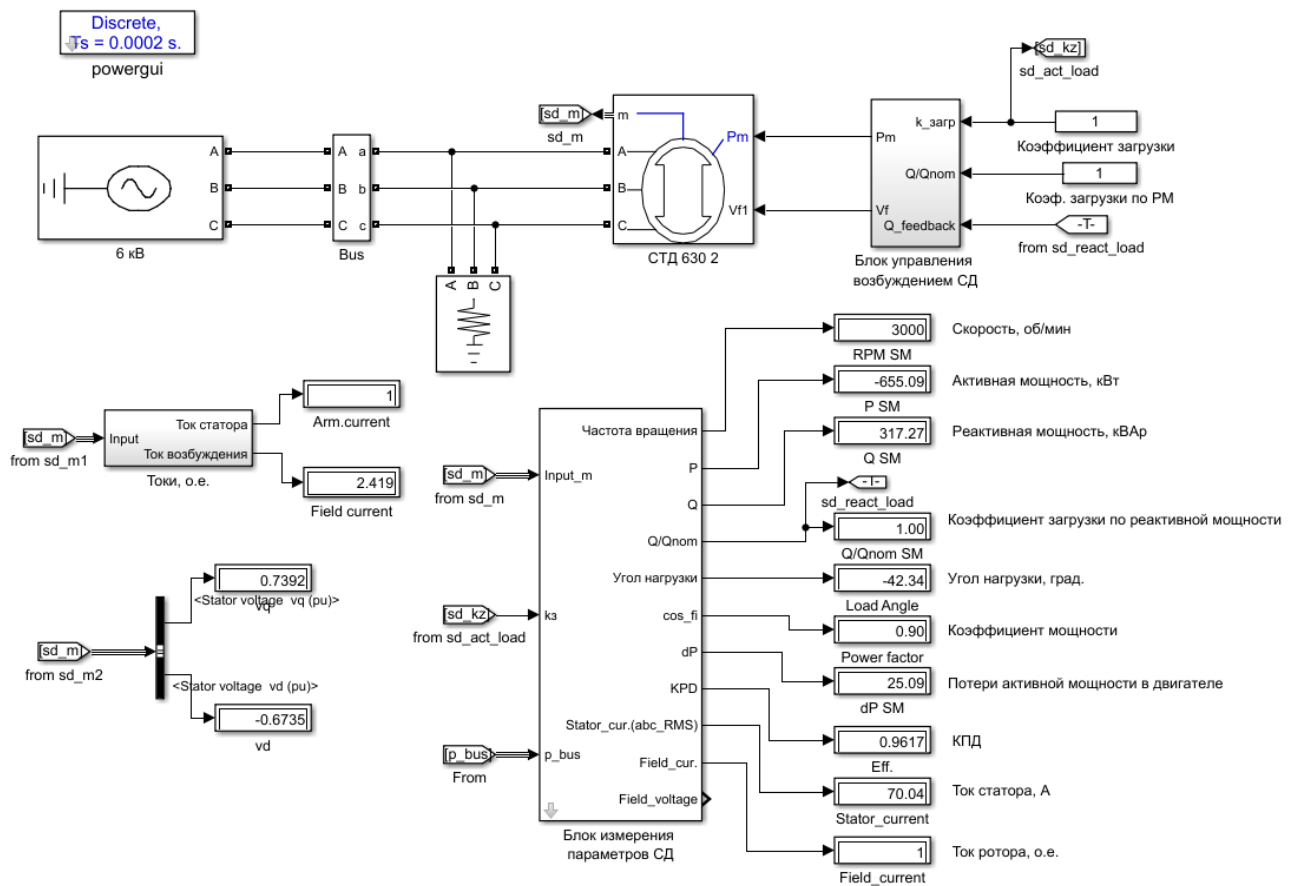


Рисунок 2.3 – Структурная схема включения, регулирования и измерения параметров модели синхронного двигателя СТД 630-2

В модели блока управления возбуждением синхронного двигателя используется пропорционально-интегральный регулятор, который в зависимости от заданного и текущего значения коэффициента загрузки двигателя реактивной мощностью ( $Q/Q_{\text{НОМ}}$ ) рассчитывает необходимое относительное значение напряжения возбуждения ( $V_f$ ) для поддержания заданной величины генерируемой или потребляемой реактивной мощности. На вход  $k_{\text{загр}}$  подается значение загрузки двигателя по активной мощности ( $P_2/P_{\text{НОМ}}$ ).

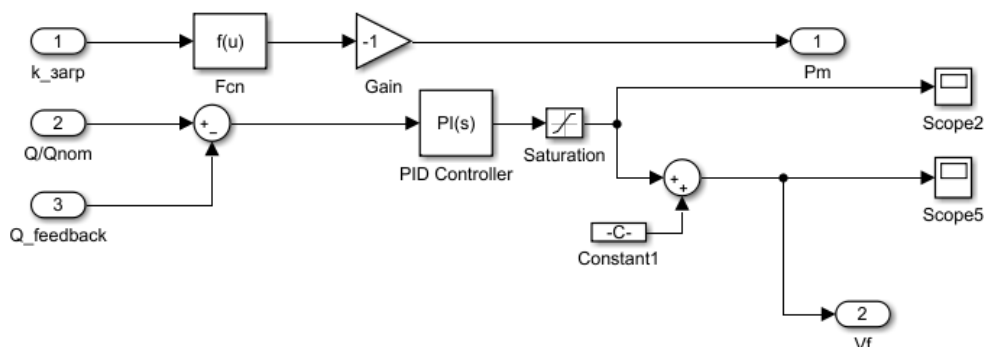


Рисунок 2.4 – Структурная схема модели блока регулирования возбуждения

В блоке измерения параметров СД, данные измерительного выхода модели СД переводятся из относительных в именованные единицы, рассчитываются коэффициент мощности и потери активной мощности в синхронном двигателе, на выходе  $Q/Q_{\text{НОМ}}$  формируется сигнал обратной связи по коэффициенту загрузки по реактивной мощности.

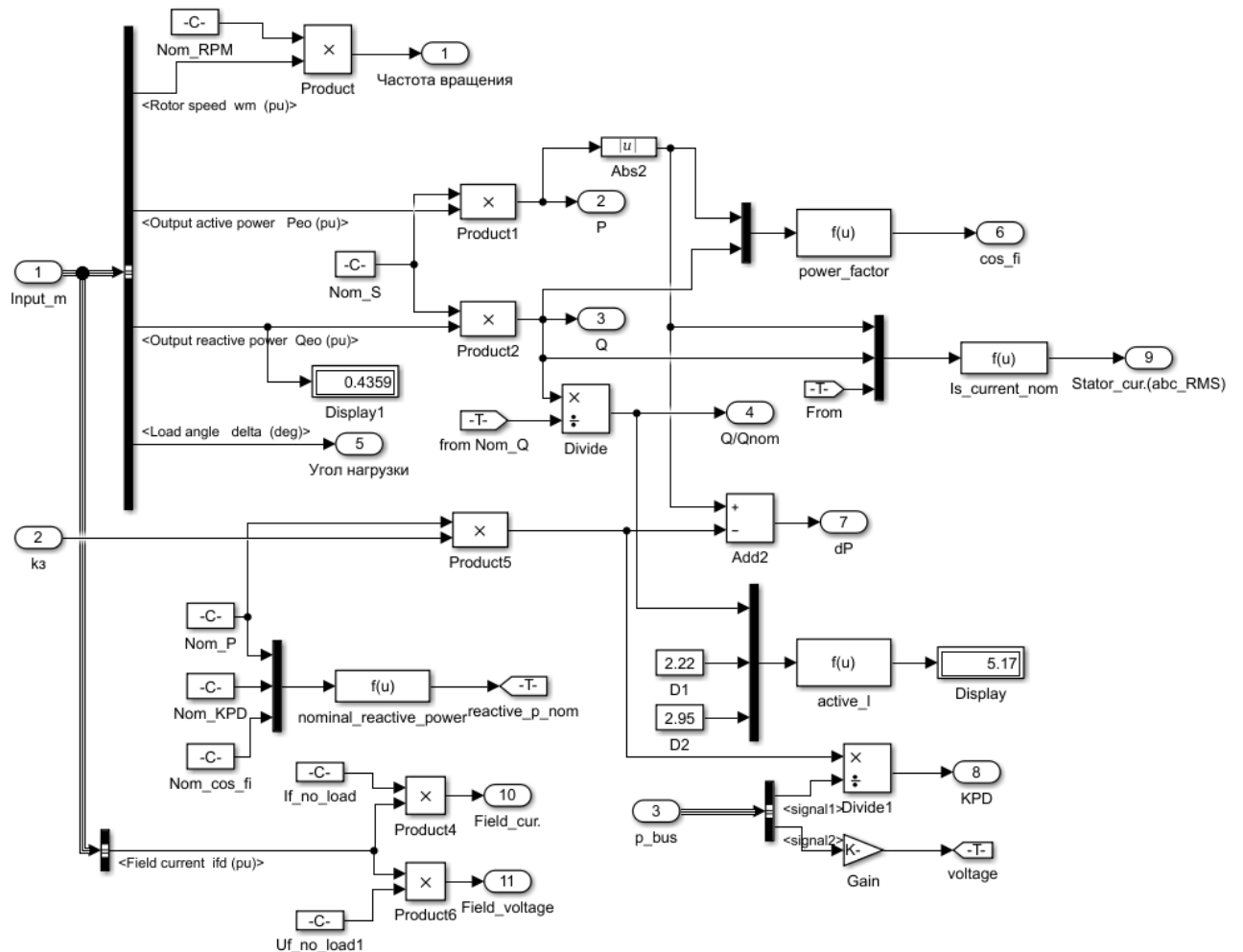


Рисунок 2.5 – Структура блока измерения параметров СД

Для проверки моделей синхронных двигателей СТД-630-2 и СД 12-46-8 произведен их запуск при номинальном напряжении питания и номинальных коэффициентах загрузки по активной и реактивной мощности. Результаты изменения скорости ротора, реактивной и активной мощности, угла нагрузки до установившихся значений за время моделирования 5 секунд, отражены на графиках, изображенных на рисунках 2.6-2.7.

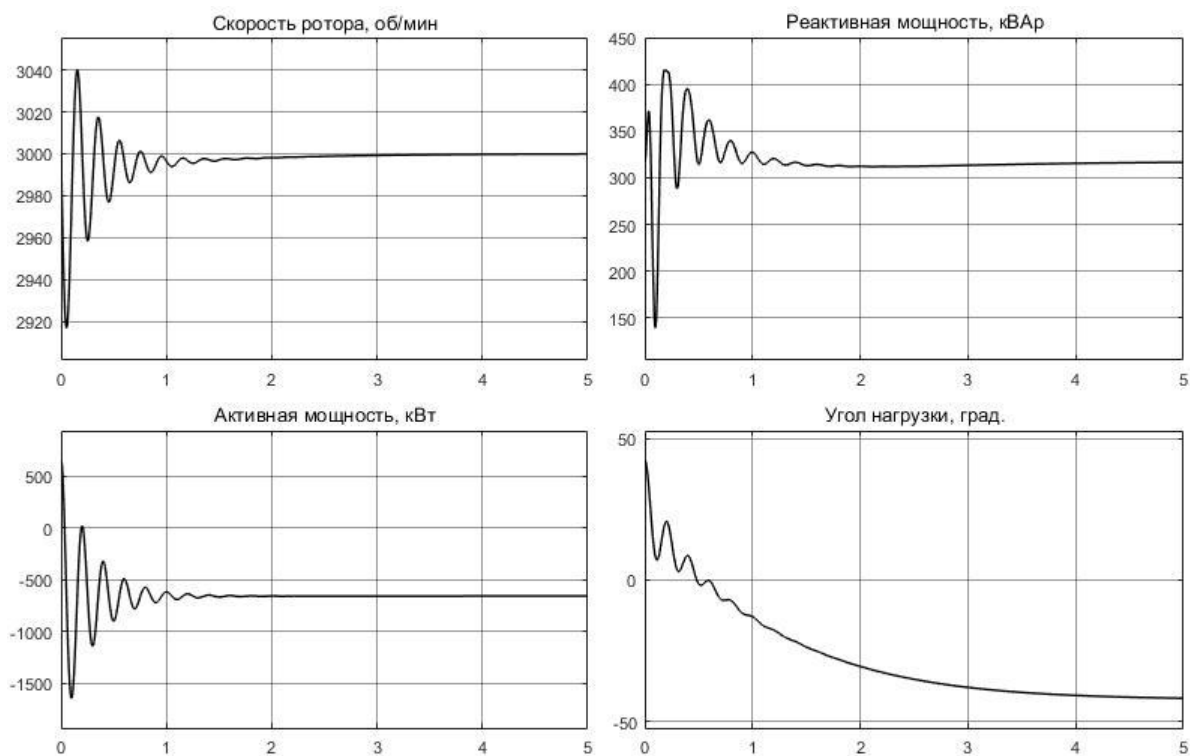


Рисунок 2.6 – Графики скорости, активной и реактивной мощностей и угла нагрузки двигателя STD 630-2 при номинальной загрузке

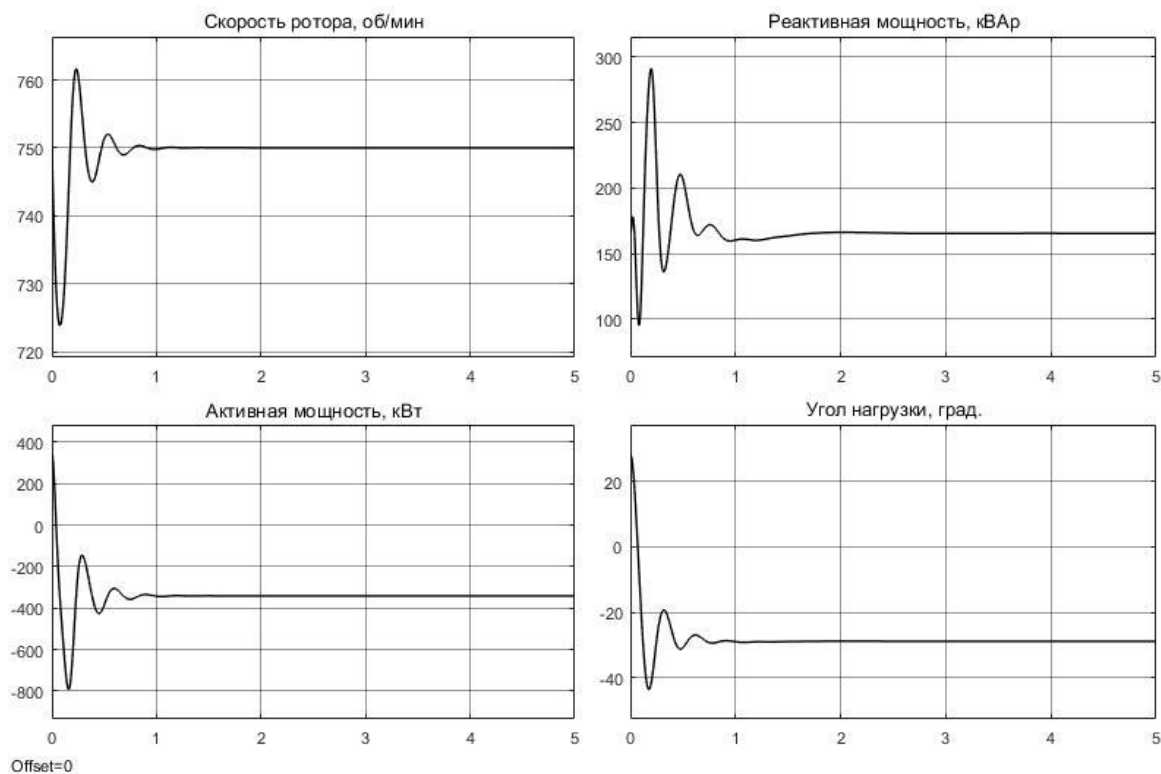


Рисунок 2.7 – Графики скорости, активной и реактивной мощностей и угла нагрузки двигателя SD 12-46-8 при номинальной загрузке

### 3 Технико-экономическое обоснование применения синхронных двигателей для генерации реактивной мощности

#### 3.1 Расчет электрических нагрузок

Определим расчетную цеховую нагрузку (0,4 кВ) предприятия. Для этого воспользуемся методом коэффициента спроса.

Расчетную нагрузку группы приемников (цехов) определяем по следующим формулам

$$P_p = K_c \cdot P_{уст};$$

$$Q_p = P_p \cdot tg\varphi;$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2},$$

где  $P_{уст}$  - установленная мощность цеховой нагрузки, кВт

$K_c$  – коэффициент спроса для цеха,

$tg\varphi$  – коэффициент реактивной мощности, соответствующий  $cos\varphi$  групповой нагрузки цеха.

Расчетные силовые и осветительные нагрузки по цехам предприятия в сети 0,4 кВ сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Расчетная нагрузка 0,4 кВ

№ п/п	Наименование потребителя (цеха)	Силовая нагрузка					Осветительная нагрузка							Силовая и осветительная нагрузка			
		$P_{н.}$ кВт	$K_c$	$\frac{\cos\varphi}{\text{tg}\varphi}$	$P_{\text{расч.}}$ кВт	$Q_{\text{расч.}}$ кВАр	$F, \text{ м}^2$	$P_{\text{уд.}}$ кВт	$P_{\text{н.о.}}$ кВт	$\cos\varphi$	$K_{с.о}$	$K_{\text{пра}}$	$P_{\text{н.о.}}$ кВт	$Q_{\text{н.о.}}$ кВт	$P_{\text{д}}+P_{\text{н.о.}}$ кВт	$Q_{\text{д}}+Q_{\text{н.о.}}$ кВАр	$S_{\text{д}}$ кВА
<b>Потребители электроэнергии 0,38 кВ</b>																	
1	Цех №1	224	0,4	0,75/0,88	89,6	78,85	1432	16	22,91	0,8	0,95	1,05	21,85	16,39	111,45	95,24	146,6
2	Цех №2	1220	0,35	0,65/1,17	427	499,6	2114	16	33,82	0,8	0,95	1,05	33,7	25,28	460,7	524,88	698,4
3	Цех №3	1500	0,5	0,7/1,02	750	765	2086	18	37,55	0,8	0,95	1,05	37,5	28,13	787,5	793,13	1117,7
4	Цех №4	302	0,4	0,67/1,1	120	82,4	864	16	13,82	0,8	0,85	1,05	12,4	9,30	132,4	91,7	161,1
5	Цех №5	2743	0,5	0,75/0,88	1371,5	1207	4941	16	79,06	0,8	0,95	1,05	78,85	59,14	1450,35	1266,14	1925,3
6	Компрессорная	427	0,5	0,8/0,75	213,5	160	1015	17	17,26	0,95	0,6	1,1	11,4	3,75	225	163,75	278,3
7	Цех №7	412	0,4	0,75/0,88	164,8	145	3948	16	63,17	0,8	0,95	1,05	63	47,25	227,8	192,25	298,1
8	Инструментальный цех	100	0,3	0,7/1,02	30	30,6	2250	15	33,75	0,95	0,85	1,1	31,6	10,39	61,6	40,99	74,0
9	Цех №9	1000	0,5	0,75/0,88	500	440	4688	16	75,01	0,8	0,95	1,05	75	56,25	575	496,25	759,5
10	Лаборатория	180	0,5	0,7/1,02	90	91,8	1209	21	25,39	0,95	0,8	1,1	22,3	7,33	112,3	99,13	149,8
11	АБК	360	0,4	0,7/1,02	144	147	5203	18	93,65	0,95	0,8	1,1	82,4	27,08	226,4	174,08	285,6
12	Модельно-конструкторский цех	170	0,3	0,8/0,75	51	38,2	2416	18	43,49	0,95	0,85	1,1	40,7	13,38	91,7	51,58	105,2
13	Котельная	410	0,5	0,8/0,75	205	153,7	750	14	10,50	0,8	0,95	1,05	10,5	7,88	215,5	161,58	269,3
14	Склады	100	0,4	0,8/0,75	40	30	3192	11	35,11	0,8	0,6	1,05	22,15	16,61	62,15	46,61	77,7
15	Столовая	35	0,4	0,9/0,48	14	6,7	1845	16	29,52	0,95	0,9	1,1	29,3	9,63	43,3	16,33	46,3
	Территория завода	—	—	—	—	—	100933	0,16	16,15	0,8	1	1,1	17,8	13,35	17,8	13,35	22,3
	<b>Итого по 0,38 кВ</b>	<b>9183</b>	<b>0,46</b>	<b>0,74/0,92</b>	<b>4210,4</b>	<b>3875,85</b>	—	—	<b>630,16</b>	<b>0,86</b>	—	—	<b>590,45</b>	<b>351,14</b>	<b>4801</b>	<b>4227</b>	<b>6397</b>

Таблица 3.2 – Суточное потребление активной мощности ЭП 0,4 кВ предприятия

Время суток	Расчетная активная нагрузка по графику $P_{ст}, \%$	Расчетная активная нагрузка ступени графика $P_{ст}, \text{кВт}$	Потребляемая активная энергия $W_{ст}, \text{кВА} \cdot \text{ч}$
0:00 – 7:00	75	3600,98	25206,83
7:00 – 8:00	90	4321,17	4321,17
8:00 – 11:00	100	4801,30	14403,9
11:00 – 12:00	80	3841,04	3841,04
12:00 – 13:00	90	4321,17	4321,17
13:00 – 17:00	100	4801,30	19205,2
17:00 – 20:00	85	4081,11	12243,32
20:00 – 22:00	80	3841,04	7682,08
22:00 – 24:00	75	3600,98	7201,95
Суточное потребление активной энергии $W_{сут}, \text{кВА} \cdot \text{ч}$			98426,66

Таблица 3.3 – Суточное потребление реактивной мощности ЭП 0,4 кВ предприятия

Время суток	Расчетная реактивная нагрузка по графику $Q_{ст}, \%$	Расчетная реактивная нагрузка ступени графика $Q_{ст}, \text{кВАр}$	Потребляемая реактивная энергия $V_{ст}, \text{кВАр} \cdot \text{ч}$
0:00 – 7:00	50	3251,54	22760,77
7:00 – 8:00	55	3576,69	3576,69
8:00 – 11:00	65	4227,00	12681,00
11:00 – 12:00	55	3576,69	3576,69
12:00 – 13:00	55	3576,69	3576,69
13:00 – 17:00	65	4227,00	16908,00
17:00 – 20:00	60	3901,85	11705,54
20:00 – 22:00	60	3901,85	7803,69
22:00 – 24:00	50	3251,54	6503,08
Суточное потребление реактивной энергии $W_{сут}, \text{кВА} \cdot \text{ч}$			89092,15



### 3.2 Техничко-экономическое сравнение асинхронных и синхронных двигателей

В данном разделе осуществим выбор между асинхронными и синхронными двигателями на основе технико-экономического расчета основанного на сравнении приведенных затрат и выберем наиболее экономичный вариант.

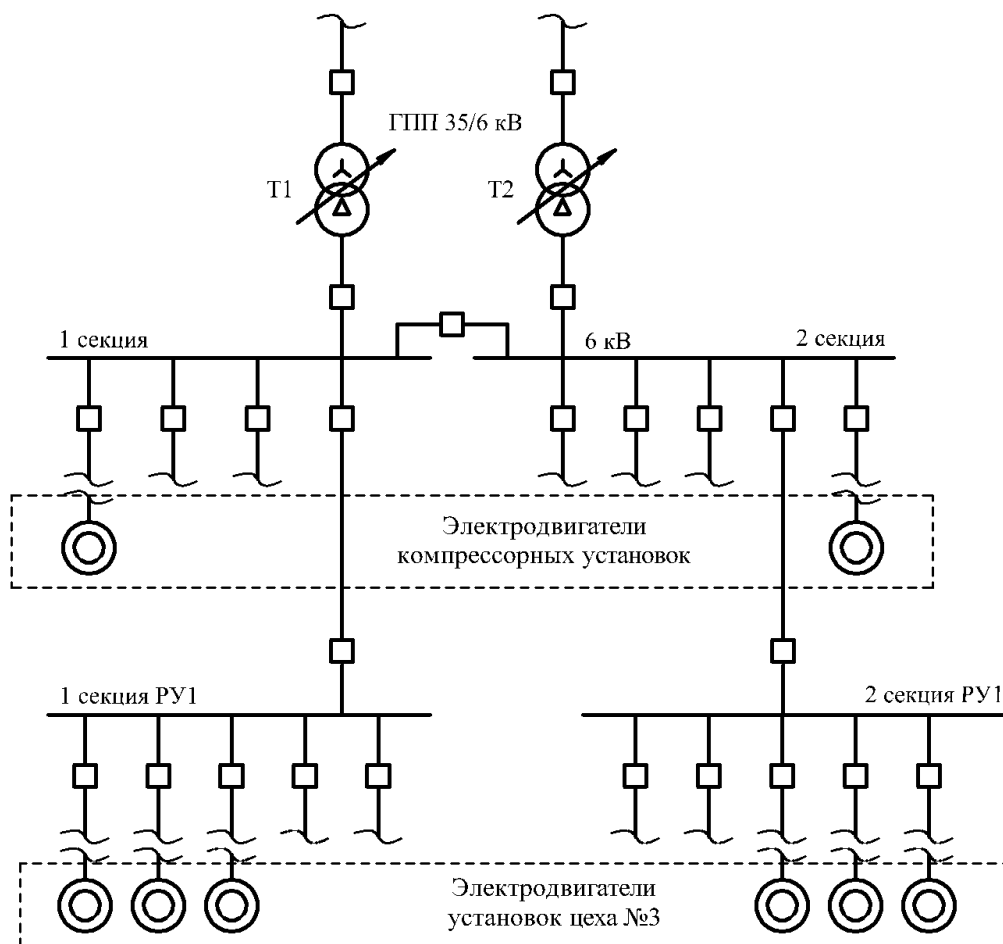


Рисунок 3.1 – Расположение электродвигателей компрессорных установок и установок цеха №3

В соответствии с технологическими требованиями, для компрессорных установок требуется двигатели мощностью 630 кВт и скоростью вращения равной или близкой к 3000 об/мин. Для привода установок цеха №3 необходимы двигатели с номинальной мощностью 315 кВт и скоростью вращения 700-750 об/мин. Регулирование частоты вращения не требуется.

Суточные графики нагрузок технологических установок изображены на рисунке 3.2

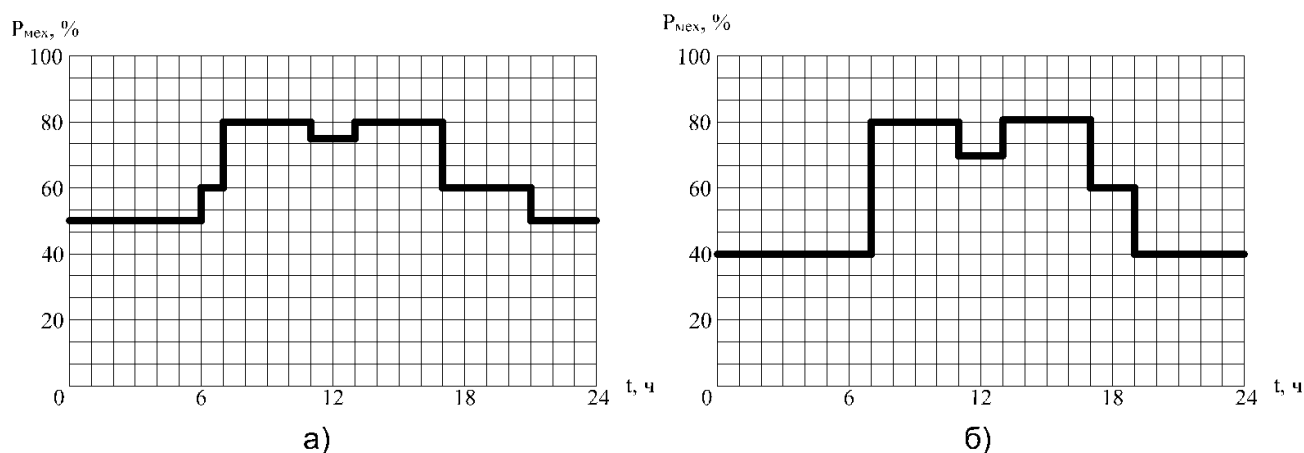


Рисунок 3.2 – Графики загрузки двигателей компрессоров (а) и установок цеха №3 (б)

Выбираем для сравнения асинхронные двигатели 2АЗМ1-630/6000УХЛ4, А4-400У-8У3 и синхронные СТД-630-2, СД-12-46-8 (6 кВ) [8].

Технико-экономические показатели рассматриваемых двигателей сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Технико-экономические показатели электродвигателей

Электродвигатель	Место установки	P <sub>н</sub> , кВт	Q <sub>н</sub> , кВАр	n, об/мин	КПД	cosφ tgφ	Цена, у.е.
Асинхронный двигатель АТД2 АЗМ1-630/6000УХЛ4	Компрессорная	630	319,3	2970	0,955	0,9 0,484	8200
Синхронный двигатель СТД-630-2			317,1	3000	0,9617	-0,9 0,484	9700
Асинхронный двигатель А4-400У-8У3	Цех №3	315	235,6	737	0,936	0,82 0,7	5360
Синхронный двигатель СД-12-46-8		320	165,3	750	0,937	-0,9 0,484	8700

Для того чтобы оценить экономичность варианта необходимо определить годовые эксплуатационные расходы при использовании в приводе асинхронного и синхронного двигателя. Пользуясь моделями рассматриваемых двигателей, разработанными в Matlab Simulink, определим потребляемую двигателями активную, реактивную мощность и величину потерь активной мощности для каждой ступени графика нагрузки при номинальном напряжении.

Таблица 3.5 – Суточное потребление одного асинхронного двигателя 2А3М1-630/6000УХЛ4 привода компрессора

Время суток	$k_{\text{загр}}$	$P_{\text{дв}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{дв}}$ , кВт	$Q_{\text{дв}}$ , кВАр	$W_{\text{дв}}$ , кВт·ч	$\Delta W_{\text{дв}}$ , кВт·ч	$V_{\text{дв}}$ , кВАр·ч
0:00 – 6:00	0,5	327,62	12,62	194,33	1965,72	75,72	1165,98
6:00 – 7:00	0,6	392,95	14,95	211,32	392,95	14,95	211,32
7:00 – 11:00	0,8	525,12	21,12	256,73	2100,48	84,48	1026,92
11:00 – 13:00	0,75	491,87	19,37	243,86	983,74	38,74	487,72
13:00 – 17:00	0,8	525,12	21,12	256,73	2100,48	84,48	1026,92
17:00 – 21:00	0,6	392,95	14,95	211,32	1571,8	59,8	845,28
21:00 – 24:00	0,5	327,62	12,62	194,33	982,86	37,86	582,99
Суточное потребление энергии					10098,03	396,03	5347,13

Таблица 3.6 – Суточное потребление одного синхронного двигателя СТД-630-2 привода компрессора

Время суток	$k_{\text{загр}}$	$P_{\text{дв}}$ , кВт		$\Delta P_{\text{дв}}$ , кВт		$Q_{\text{дв}}$ , кВАр	$W_{\text{дв}}$ , кВт·ч		$\Delta W_{\text{дв}}$ , кВт·ч	
		при $\cos\varphi=0,9$	при $\cos\varphi=1$	при $\cos\varphi=0,9$	при $\cos\varphi=1$		при $\cos\varphi=0,9$	при $\cos\varphi=1$	при $\cos\varphi=0,9$	при $\cos\varphi=1$
0:00 – 6:00	0,5	331,83	329,77	16,83	14,77	158,64	1990,98	1978,62	100,98	88,62
6:00 – 7:00	0,6	396,37	393,76	18,37	15,76	190,36	396,37	393,76	18,37	15,76
7:00 – 11:00	0,8	525,62	521,76	21,62	17,76	253,82	2102,48	2087,04	86,48	71,04
11:00 – 13:00	0,75	493,29	489,76	20,79	17,26	237,96	986,58	979,52	41,58	34,52
13:00 – 17:00	0,8	525,62	521,76	21,62	17,76	253,82	2102,48	2087,04	86,48	71,04
17:00 – 21:00	0,6	396,37	393,76	18,37	15,76	190,36	1585,48	1575,04	73,48	63,04
21:00 – 24:00	0,5	331,83	329,77	16,83	14,77	158,64	995,49	989,31	50,49	44,31
Суточное потребление активной энергии $W_{\text{сут}}$ , кВт·ч							10159,86	10090,33	457,86	388,33

Таблица 3.7– Суточное потребление одного асинхронного двигателя А4-400У-8У3 привода установок цеха №3

Время суток	$k_{\text{загр}}$	$P_{\text{дв}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{дв}}$ , кВт	$Q_{\text{дв}}$ , кВАр	$W_{\text{дв}}$ , кВт·ч	$\Delta W_{\text{дв}}$ , кВт·ч	$V_{\text{дв}}$ , кВАр·ч
0:00 – 7:00	0,4	132,65	6,65	181,72	928,55	46,55	1272,04
7:00 – 11:00	0,8	267,19	15,19	210,38	1068,76	60,76	841,52
11:00 – 13:00	0,7	232,92	12,42	200,67	465,84	24,84	401,34
13:00 – 17:00	0,8	267,19	15,19	210,38	1068,76	60,76	841,52
17:00 – 19:00	0,6	199,09	10,09	192,73	398,18	20,18	385,46
19:00 – 24:00	0,4	132,65	6,65	181,72	663,25	33,25	908,6
Суточное потребление энергии					4593,34	246,34	4650,48

Таблица 3.8 – Суточное потребление одного синхронного двигателя СД-12-46-8 привода установок цеха №3

Время суток	$k_{загр}$	$P_{дв}$ , кВт		$\Delta P_{дв}$ , кВт		$Q_{дв}$ , кВАр	$W_{дв}$ , кВт·ч		$\Delta W_{дв}$ , кВт·ч	
		при $\cos\varphi=0,9$	при $\cos\varphi=1$	при $\cos\varphi=0,9$	при $\cos\varphi=1$		при $\cos\varphi=0,9$	при $\cos\varphi=1$	при $\cos\varphi=0,9$	при $\cos\varphi=1$
0:00 – 7:00	0,4	140,12	137,9	12,12	9,90	66,16	980,84	965,3	84,84	69,3
7:00 – 11:00	0,8	273,81	268,04	17,81	12,04	132,32	1095,24	1072,16	71,24	48,16
11:00 – 13:00	0,7	240,18	235,42	16,18	11,42	115,78	480,36	470,84	32,36	22,84
13:00 – 17:00	0,8	273,81	268,04	17,81	12,04	132,32	1095,24	1072,16	71,24	48,16
17:00 – 19:00	0,6	206,68	202,86	14,68	10,86	99,24	413,36	405,72	29,36	21,72
19:00 – 24:00	0,4	140,12	137,9	12,12	9,90	66,16	700,6	689,5	60,6	49,5
Суточное потребление активной энергии $W_{сут}$ , кВт·ч							4765,64	4675,68	349,64	259,68

Произведем сравнение вариантов установки СД работающих в режиме с  $\cos\varphi = 1$  и АД без статических конденсаторов.

Расчетные затраты рассчитываем по формуле

$$Z_{дв} = K_{дв} \cdot p_{дв} + \tau \cdot \Delta C_э \cdot \Delta P,$$

где  $K_{дв}$  - стоимость двигателя [8], у.е;

$p_{дв} = 0,204$  – суммарные отчисления для электродвигателей мощностью свыше 100 кВт [9, с.32];

$\Delta C_э = 0,02$  - стоимость 1 кВтч электрической энергии, у.е./кВтч;

$\tau$  – число часов потерь при максимальной нагрузке на валу, ч;

$\Delta P_{дв}$  – потери активной мощности в двигателе, кВт;

Число часов максимальных потерь определяем по формуле

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{W_{дв} \cdot 365}{P_{max} \cdot 10000} \right)^2 \cdot 8760$$

Рассчитаем затраты на двигатели привода компрессоров ( $P_{дв} = 630$  кВт)

$$Z_{а.д.} = 8200 \cdot 0,204 + 5975,3 \cdot 0,02 \cdot 21,12 = 4198 \text{ у.е./год}$$

$$Z_{с.д.}^{\cos\varphi=1} = 9700 \cdot 0,204 + 6033 \cdot 0,02 \cdot 17,76 = 4122 \text{ у.е./год}$$

$$Z_{с.д.}^{\cos\varphi=0,9} = 9700 \cdot 0,204 + 6027,8 \cdot 0,02 \cdot 21,62 = 4585 \text{ у.е./год}$$

Расчетные затраты на АД и СД установок цеха №3 ( $P_{дв} = 320$  кВт)

$$Z_{а.д.} = 5360 \cdot 0,204 + 4947 \cdot 0,02 \cdot 15,19 = 2596 \text{ у. е./год}$$

$$Z_{с.д.}^{cos\varphi=1} = 8700 \cdot 0,204 + 5069 \cdot 0,02 \cdot 12,04 = 2995,4 \text{ у. е./год}$$

$$Z_{с.д.}^{cos\varphi=0,9} = 8700 \cdot 0,204 + 5050 \cdot 0,02 \cdot 17,81 = 3573,6 \text{ у. е./год}$$

Из приведенного расчета видно, что минимальные расчетные затраты будут иметь синхронные двигатели СТД 630-2 работающие без генерации реактивной мощности, т.к. в таком режиме работы суммарные потери активной мощности, в соответствии с суточным графиком нагрузки двигателей компрессорной составят  $\Sigma \Delta W_{с.д.}^{cos\varphi=1} = 388,33$  кВт · ч . Кроме того, в данном случае будем иметь разгрузку сети на величину реактивной мощности потребляемой асинхронным двигателем. В то же время, в данном сравнении, синхронный двигатель, работающий с номинальным коэффициентом мощности ( $cos\varphi = 0,9$ ), является менее экономичным вариантом по сравнению с АД, т.к. в данном случае имеют место большие суммарные потери активной энергии связанные с генерацией реактивной мощности  $\Sigma \Delta W_{с.д.}^{cos\varphi=0,9} = 457,86$  кВт · ч. Учитывая то, что при работе АД потребляет реактивную мощность, следовательно, данная мощность при отсутствии других источников реактивной мощности в сети должна быть скомпенсирована статическими конденсаторами. Поэтому необходимо оценить экономичность использования АД с ВКУ и СД работающим в режиме выработки реактивной мощности.

Сравним по технико-экономическим показателям асинхронные и синхронные двигатели для применения их в приводах компрессоров и установках цеха №3 с учетом требования компенсации реактивной мощности.

Рассчитываем экономический эквивалент реактивной мощности для БК

$$k_{\text{эк}} = \Delta P_{\text{у.п.}} = p \cdot \frac{K_{\text{у.бк.}}}{\gamma} + \Delta P_{\text{у.бк.}}$$

где  $\Delta P_{\text{у.п.}}$  – удельные приведенные потери, кВт/кВАр;

$K_{\text{у.бк.}} = 4,9$  у. е./кВАр – капитальные вложения на установку статических конденсаторов 6кВ [4, с.167];

$p = 0,225$  – коэффициент амортизационных отчислений для статических конденсаторов [9, с.32];

$\gamma$  – стоимость 1 кВт в год:  $\gamma = C_{\text{э}} \cdot T_{\text{г}}$ , у.е.;

$T_{\text{г}}$  – годовое время включения, ч;

$\Delta C_{\text{э}} = 0,02$  - стоимость 1 кВтч электрической энергии, у.е./кВтч;

$\Delta P_{\text{у.бк.}} = 0,003$  – удельные потери в статических конденсаторах, кВт/кВАр [4, с.167].

$$k_{\text{эк}} = 0,225 \cdot \frac{4,9}{0,02 \cdot 8760} + 0,003 = 0,0093 \text{ кВт/кВАр}$$

Приведенные потери активной мощности асинхронного двигателя при различной нагрузке двигателя

$$\Delta P'_{\text{а.д.}} = \Delta P_{\text{а.д.}} + k_{\text{эк}} \cdot Q_{\text{а.д.}}$$

$$\Delta P'_{\text{а.д.},0,5} = 12,62 + 0,0093 \cdot 194,33 = 14,427 \text{ кВт}$$

$$\Delta P'_{\text{а.д.},0,6} = 14,95 + 0,0093 \cdot 211,32 = 16,915 \text{ кВт}$$

$$\Delta P'_{\text{а.д.},0,75} = 19,37 + 0,0093 \cdot 243,86 = 21,638 \text{ кВт}$$

$$\Delta P'_{\text{а.д.},0,8} = 21,12 + 0,0093 \cdot 256,73 = 23,508 \text{ кВт}$$

Определяем годовые потери энергии

$$\Delta W_{\Gamma} = \Sigma \Delta P_i \cdot t_i$$

$$\Delta W_{\Gamma} = (14,427 \cdot 9 + 16,915 \cdot 5 + 21,638 \cdot 2 + 23,638 \cdot 8) \cdot 365 = 162701,67 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Удельные активные потери на 1 кВАр генерируемой двигателем мощности

$$\Delta P_{\text{сд,уд}} = \frac{D_1}{Q_{\text{с.д.ном}}} + \frac{D_2}{Q_{\text{с.д.ном}}^2} = \frac{2,95}{317,1} + \frac{2,22}{317,1^2} = 0,0093 \text{ кВт/кВАр}$$

Приведенные потери синхронного двигателя

$$\Delta P'_{\text{с.д.0,5}} = 16,83 - 0,0093 \cdot 158,64 = 15,355 \text{ кВт}$$

$$\Delta P'_{\text{с.д.0,6}} = 18,37 - 0,0093 \cdot 190,36 = 16,6 \text{ кВт}$$

$$\Delta P'_{\text{с.д.0,75}} = 20,79 - 0,0093 \cdot 237,96 = 18,577 \text{ кВт}$$

$$\Delta P'_{\text{с.д.0,8}} = 21,62 - 0,0093 \cdot 253,82 = 19,259 \text{ кВт}$$

Определяем годовые потери электроэнергии

$$\Delta W_{\Gamma} = (15,355 \cdot 9 + 16,6 \cdot 5 + 18,557 \cdot 2 + 19,259 \cdot 8) \cdot 365 = 150533,665 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Стоимость годовых потерь электроэнергии

$$C_{\Pi} = C_{\text{э}} \cdot \Delta W_{\Gamma}$$

Определяем приведенные годовые затраты по формуле

$$Z = p \cdot K + C_{\Pi}$$

Срок окупаемости рассчитываем по формуле

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_1 - K_2}{C_{\Pi 1} - C_{\Pi 2}}$$

Аналогичным способом рассчитываем приведенные затраты для приводов установок цеха 3. Результаты расчетов сведены в таблицу 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты расчета технико-экономического сравнения выбора типа двигателей

Показатели	Единицы измерения	Обозначение	Привод компрессоров		Привод установок цеха №3	
			Вариант с АД	Вариант с СД	Вариант с АД	Вариант с СД
Номинальная мощность	кВт	$P_{ном}$	630	630	315	320
Капитальные вложения	у.е.	К	8200	9700	5360	8700
Суммарный коэффициент отчислений	-	p	0,225	0,205	0,225	0,205
КПД двигателя	%	$\eta$	0,955	0,9617	0,936	0,937
Коэффициент мощности	-	$cos\varphi$	0,9	-0,9	0,82	-0,9
Экономический эквивалент реактивной мощности	кВт/кВАр	$k_{эк}$	0,0093	0,0093	0,0093	0,024
Годовые приведенные потери активной энергии	кВт ч	$\Delta W_r$	162701,67	150533,665	105701,08	107621,71
Стоимость годовых потерь электроэнергии	у.е./год	$\Delta C_{э.год.}$	3254	3010,7	2114	2152,4
Годовые приведенные затраты	у.е./год	З	5100	5000	3320	3935,9
Срок окупаемости	лет	$T_{ок}$	6,2		87	

Наиболее экономичным вариантом будет установка синхронных двигателей для приводов компрессоров. Вариант использования синхронных двигателей установок цеха №3, как показал расчет, менее экономичен по сравнению с использованием АД+ВКУ. Срок окупаемости первого варианта 6,2 года, что меньше нормативного, следовательно, экономичным будет вариант с большими капитальными вложениями и меньшими эксплуатационными расходами. Во втором сравнении срок окупаемости значительно превышает нормативное значение, поэтому экономичней будет вариант с меньшими капитальными вложениями [13, с.56].



### 3.3 Баланс реактивной мощности и определение располагаемой мощности синхронных двигателей

Составим баланс и определим величину реактивной мощности, которую необходимо скомпенсировать с учетом располагаемой мощности СД и КБ 0,4кВ

$$\Sigma Q_{н.б.} = (Q_{расч}^{нн} + Q_{расч}^{вн} + \Delta Q_{ц.тр.} + \Delta Q_{кл.}) - (Q_{эк} + Q_{сд} + Q_{ку.нн.}),$$

где  $Q_{расч}^{нн}$  – расчетная цеховая нагрузка сети 0,4 кВ, кВАр;

$Q_{расч}^{вн}$  – расчетная нагрузка 6 кВ, кВАр;

$\Delta Q_{ц.тр.}$  – потери реактивной мощности в цеховых трансформаторах, кВАр;

$\Delta Q_{кл.}$  – потери реактивной мощности в кабельных линиях, кВАр;

$Q_{ку.нн.}$  – мощность установленных конденсаторных батарей в сети 0,4 кВ, кВАр;

$Q_{сд}$  – располагаемая мощность синхронных двигателей, кВАр;

$Q_{эк}$  – величина реактивной мощности получаемой от энергосистемы в режиме наибольших активных нагрузок, кВАр.

$$Q_{эк} = P_p \cdot tg\varphi_{эк},$$

где  $P_p$  - расчетная активная нагрузка предприятия, кВт;

$tg\varphi_{эк}$  - экономический коэффициент реактивной мощности, передаваемой из сети энергосистемы в сеть предприятия в режиме наибольших активных нагрузок энергосистемы.

Для предприятий расположенных в Сибири  $tg\varphi_{эк} = 0,24$  при напряжении питающей линии 35 кВ [2, с.35].

Расчетную активную нагрузку предприятия рассчитываем по формуле

$$P_p = P_{расч}^{нн} + P_{расч}^{вн} + \Delta P_{ц.тр.} + \Delta P_{кл.},$$

где  $P_{расч}^{нн}$ ,  $P_{расч}^{вн}$  – расчетные нагрузки в сети 0,4 и 6 кВ, кВт;

$\Delta P_{ц.тр.}$  – потери мощности в цеховых трансформаторах, кВт;

$\Delta P_{кл.}$  – потери мощности кабельных линиях, кВт.

Рассчитываем потери активной и реактивной мощности в цеховых трансформаторах (трансформаторы работают отдельно)

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{кз}} \cdot (k_{\text{зтр1}}^2 + k_{\text{зтр2}}^2) + n_{\text{тр}} \cdot \Delta P_{\text{хх}}, \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{кз}} \cdot S_{\text{ном.тр}}}{100} \cdot (k_{\text{зтр1}}^2 + k_{\text{зтр2}}^2) + n_{\text{тр}} \cdot \frac{I_{\text{хх}} \cdot S_{\text{ном.тр}}}{100}, \text{ кВАр}$$

Паспортные данные трансформаторов [1] сведены в таблицу 3.10.

Таблица 3.10 – Паспортные данные трансформаторов

Подстанция	Тип	Тип регулятора и пределы регулирования	$S_{\text{ном}}$ , кВА	$U_{\text{ном}}$ ВН/НН, кВ	$u_{\text{кз}}$ , %	$\Delta P_{\text{кз}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{хх}}$ , кВт	$I_{\text{хх}}$ , %
ГПП	ТМН-6300/35	РПН $\pm 6 \times 1,5$	6300	35/6,3	7,5	46,5	9,2	0,9
ТП2	ТМ-1600/6	ПБВ $\pm 2 \times 2,5$	1600	6,3/0,4	6,5	18,0	2,8	1,3
ТП1	ТМ-1000/6		1000		5,5	12,2	2,3	1,5
ТП3,5	ТМ-630/6		630		5,5	7,6	1,42	2,0
ТП4	ТМ-400/6		400		4,5	5,9	0,92	2,1

Таблица 3.11 – Расчетные нагрузки цеховых подстанций с учетом компенсации РМ в сети 0,4 кВ и потери активной и реактивной мощности в трансформаторах

Цеха, входящие в группу	Обозначение на генплане	$P_p$ , кВт	$Q_{p+\text{кб}}$ , кВАр	$S_p$ , кВА	$\cos \varphi$	$k_z$	$n_{\text{тр}}$	$S_{\text{н.тр.}}$ , кВА	$\Delta P_{\text{ТП}}$ , кВт	$\Delta Q_{\text{ТП}}$ , кВАр
1,2,3	ТП-1	1360	413,25	1421,4	0,96	0,71	2	1000	17,0	85,56
5,9,14	ТП-2	2087,5	809	2238,8	0,93	0,7	2	1600	23,22	143,4
4,6,10,13	ТП-3	685,2	516,16	857,86	0,8	0,68	2	630	9,88	57,3
7,8	ТП-4	289,4	233,24	371,7	0,78	0,9	1	400	6,01	24,0
11,12,15	ТП-5	379,2	255,34	457,16	0,83	0,7	1	630	5,42	30,8
		4801,3	2226,99	5292,6	0,9		8		61,53	341,06

Рассчитываем потери активной и реактивной мощности в кабельных линиях

$$\Delta P_{\text{кл}} = 3 \cdot I_p^2 \cdot R \cdot n_{\text{кл}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_{\text{кл}} = 3 \cdot I_p^2 \cdot X \cdot n_{\text{кл}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВАр}$$

Таблица 3.12 – Расчетные токи и сопротивления кабельных линий сети 6 кВ и потери активной и реактивной мощности

Обозначение	Назначение линии	Кол-во линий	Расчетный ток на один кабель $I_{расч.}, А$	Длина линии $l, км$	Сечение кабеля, $S, мм^2$	Сопротивления		$\Delta P_{кл}, кВт$	$\Delta Q_{кл}, кВАр$
						R, Ом	X, Ом		
Л-1	ГПП-РУ1	2	192,6	0,1	150	0,02	0,0074	4,45	1,65
Л-2	РУ1-ТП1	2	70,5	0,01	50	0,0062	0,00083	0,184	0,02
Л-3	РУ1-ТП5	1	46,12	0,3	35	0,267	0,0261	1,7	0,17
Л-4	ГПП-ТП2	2	111,4	0,13	70	0,0576	0,0104	4,28	0,774
Л-5	ГПП-ТП3	2	43,3	0,12	25	0,149	0,01	1,676	0,112
Л-6	ГПП-ТП4	1	37,7	0,21	25	0,26	0,019	1,11	0,08
Л-7	ГПП-М1-М2	2	56,25	0,07	35	0,062	0,0061	1,2	0,12
-	ГПП-М3-М8	6	33	0,05	25	0,062	0,0045	1,21	0,09
Суммарные потери в КЛ								15,81	3,016

Рассчитаем баланс реактивной мощности для нескольких вариантов:

Вариант 1 – Все установленные высоковольтные двигатели асинхронные;

Вариант 2 – Двигатели компрессорной заменены на синхронные;

Вариант 3 – Двигатели компрессорной и 2 двигателя цеха №3 заменены на синхронные;

Вариант 4 - Двигатели компрессорной и 4 двигателя цеха №3 заменены на синхронные;

Вариант 5 – Все двигатели заменены на синхронные.

Таблица 3.13 – Характеристики синхронных двигателей

Электродвигатель	Место установки	$P_n,$ кВт	$Q_n,$ кВАр	$n,$ об/мин	КПД	$\frac{\cos\varphi}{\text{tg}\varphi}$	D1, кВт	D2, кВт
Синхронный двигатель СТД-630-2	Компрессорная	630	317,1	3000	0,9617	-0,9 0,484	2,95	2,22
Синхронный двигатель СД-12-46-8	Цех №3	320	165,3	750	0,937	-0,9 0,484	3,93	3,35

Определим величины располагаемых реактивных мощностей синхронных двигателей при различных коэффициентах загрузки по активной мощности при выдаче двигателем номинальной реактивной мощности и с учетом допустимой перегрузки. Данные величины и суммарные потери активной мощности в двигателе, определим с помощью моделей синхронных двигателей при номинальном напряжении. Допустимый коэффициент перегрузки по реактивной мощности определяется при соответствии условию  $I_{возб.} \sim I_{возб.ном}, I_{ст.} \leq I_{ст.ном}.$

Располагаемую реактивную мощность двигателя также можно рассчитать по формуле

$$Q_{\text{расп}} = \alpha_m \cdot \frac{P_{\text{ном}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}},$$

где  $\alpha_m$  - коэффициент перегрузки по реактивной мощности.

Потери активной мощности связанные с генерацией реактивной определены по формуле

$$\Delta P_{\text{сд.рм}} = D_1 \cdot \frac{Q_{\text{сд}}}{Q_{\text{ном.сд}}} + D_2 \cdot \frac{Q_{\text{сд}}^2}{Q_{\text{ном.сд}}^2},$$

где  $D_1, D_2$  - параметры синхронного двигателя, величина которых зависит от типа двигателя, его мощности и частоты вращения [6].

Таблица 3.14 – Располагаемая реактивная мощность и потери при различных коэффициентах загрузки и перегрузке по реактивной мощности для двигателя СТД-630-2

$P_p$ , кВт	Коэффициент загрузки реактивной мощностью $\alpha_m$	Потери мощности связанные с генерацией РМ $\Delta P_{\text{сд.рм}}$ , кВт	Суммарные потери мощности $\Sigma \Delta P$ , кВт	Относительные потери активной мощности $\Delta P_{\text{сд}}/Q_{\text{расп}}$ , %	Располагаемая реактивная мощность $Q_{\text{расп}}$ , кВАр
$k_3 = 0,8$					
527,05	1,0	5,17	23,05	1,63	317,27
529,92	1,34	7,94	25,95	1,87	425,15
$k_3 = 0,75$					
495,05	1,0	5,17	22,55	1,63	317,27
498,19	1,37	8,21	25,69	1,9	434,67
$k_3 = 0,6$					
399,05	1,0	5,17	21,05	1,63	317,27
403,65	1,52	9,6	25,65	2,0	482,26
$k_3 = 0,5$					
335,06	1,0	5,17	20,06	1,63	317,27
340,48	1,6	10,4	25,48	2,05	507,64

Таблица 3.15 – Располагаемая реактивная мощность и потери при различных коэффициентах загрузки и перегрузке по реактивной мощности для двигателя СД-12-46-8

$P_p$ , кВт	Коэффициент загрузки реактивной мощностью $\alpha_m$	Потери мощности связанные с генерацией РМ $\Delta P_{сд,рм}$ ,кВт	Суммарные потери мощности $\Sigma \Delta P$ ,кВт	Относительные потери активной мощности $\Delta P_{сд}/Q_{расп.}$ , %	Располагаемая реактивная мощность $Q_{расп.}$ кВАр
$k_3 = 0,8$					
276,1	1,0	7,28	20,08	4,4	165,4
279,22	1,24	10,0	23,22	4,876	205,1
$k_3 = 0,7$					
243,44	1,0	7,28	19,44	4,4	165,4
247,74	1,32	11,0	23,74	5,04	218,33
$k_3 = 0,6$					
210,87	1,0	7,28	18,87	4,4	165,4
216,35	1,4	12,1	24,35	5,225	231,56
$k_3 = 0,4$					
145,88	1,0	7,28	17,88	4,4	165,4
153,74	1,55	14,14	25,74	5,515	256,38

Суммарная располагаемая мощность у двигателей СТД-630-2 составляет

$$\Sigma Q_{расп} = 2 \cdot 317,27 = 634,54 \text{ кВАр}$$

с учетом допустимой перегрузки в режиме максимальной нагрузки

$$\Sigma Q_{расп.перегр.} = 2 \cdot 425,15 = 850,3 \text{ кВАр}$$

Суммарная располагаемая мощность у двигателей СД-12-46-8 составляет

$$\Sigma Q_{расп} = 6 \cdot 165,4 = 992,4 \text{ кВАр}$$

с учетом допустимой перегрузки в режиме максимальной нагрузки

$$\Sigma Q_{расп.перегр.} = 6 \cdot 205,1 = 1230,6 \text{ кВАр}$$

Составим баланс активной и реактивной мощности и определим небаланс реактивной мощности в сети предприятия, с учетом использования номинальной располагаемой мощности синхронных двигателей и с их допустимой перегрузкой в соответствии с таблицами 3.14 и 3.15.

Результаты расчета сведены в таблицы 3.16 и 3.17.

Таблица 3.16 – Баланс реактивных мощностей по вариантам в режиме максимума при работе синхронных двигателей с номинальной реактивной мощностью

Вариант	Расчетная реактивная нагрузка 0,4 кВ $Q_{р.нн}$ , кВАр	Реактивная мощность конденсаторных батарей 0,4 кВ $Q_{БКН}$ , кВАр	Суммарные потери реактивной мощности в цеховых трансформаторах $\Sigma \Delta Q_{тр.ц.}$ , кВАр	Суммарные потери реактивной мощности в кабельных линиях сети 6 кВ $\Sigma \Delta Q_{кл.}$ , кВАр	Расчетная реактивная нагрузка 6 кВ $Q_{р.вн}$ , кВАр	Суммарная расчетная реактивная нагрузка предприятия $\Sigma Q_{р.}$ , кВАр	Реактивная мощность передаваемая из энергосистемы $Q_{эк}$ , кВАр	Располагаемая реактивная мощность синхронных двигателей $Q_{сл.}$ , кВАр	Небаланс реактивной мощности $Q_{н.б.}$ , кВАр	Суммарная расчетная активная нагрузка 0,4 и 6 кВ $\Sigma P_{р.нн+вн}$ , кВт	Суммарные потери активной мощности в цеховых трансформаторах $\Sigma \Delta P_{тр.ц.}$ , кВт	Суммарные потери активной мощности в кабельных линиях 6 кВ $\Delta P_{кл.}$ , кВт	Суммарная расчетная активная нагрузка предприятия $\Sigma P_{р.}$ , кВт
1	4227	2000	341,06	3,016	1775,8	4347	1808	0	2539	7454,7	61,53	15,81	7532
2					1262,4	3833,5	1809	634,5	1390	7458,5			7536
3					841,6	3412,7	1813	965	634,7	7476,3			7554
4					420,8	2991,8	1817	1296	-121,2	7494,1			7571,4
5					0	2571,1	1821	1626,6	-876,5	7511,9			7589,2

Таблица 3.17 – Баланс реактивных мощностей по вариантам в режиме максимума при работе синхронных двигателей с допустимой перегрузкой

Вариант	Расчетная реактивная нагрузка 0,4 кВ $Q_{р.нн}$ , кВАр	Реактивная мощность конденсаторных батарей 0,4 кВ $Q_{БКН}$ , кВАр	Суммарные потери реактивной мощности в цеховых трансформаторах $\Sigma \Delta Q_{тр.ц.}$ , кВАр	Суммарные потери реактивной мощности в кабельных линиях сети 6 кВ $\Sigma \Delta Q_{кл.}$ , кВАр	Расчетная реактивная нагрузка 6 кВ $Q_{р.вн}$ , кВАр	Суммарная расчетная реактивная нагрузка предприятия $\Sigma Q_{р.}$ , кВАр	Реактивная мощность передаваемая из энергосистемы $Q_{эк}$ , кВАр	Располагаемая реактивная мощность синхронных двигателей $Q_{сл.}$ , кВАр	Небаланс реактивной мощности $Q_{н.б.}$ , кВАр	Суммарная расчетная активная нагрузка 0,4 и 6 кВ $\Sigma P_{р.нн+вн}$ , кВт	Суммарные потери активной мощности в цеховых трансформаторах $\Sigma \Delta P_{тр.ц.}$ , кВт	Суммарные потери активной мощности в кабельных линиях 6 кВ $\Delta P_{кл.}$ , кВт	Суммарная расчетная активная нагрузка предприятия $\Sigma P_{р.}$ , кВт
1	4227	2000	341,06	3,016	1775,8	4347	1808	0	2539	7454,7	61,53	15,81	7532
2					1262,4	3833,5	1810	850,3	1173	7464			7541
3					841,6	3412,7	1816	1260,5	336,2	7488,4			7566
4					420,8	2991,8	1821	1671	-500	7512			7589
5					0	2571,1	1827	2080,9	-1336,8	7536			7613

Из полученного расчета видно, что при использовании располагаемой реактивной мощности двигателей, в соответствии с вариантами 4 и 5, в узле будет избыточная генерация реактивной мощности. Как показал предыдущий расчет, даже при работе двигателей СД 12-46-8 в режиме  $\cos\varphi = 1$ , данные двигатели будут менее экономичными по сравнению с асинхронными используемыми совместно со статическими конденсаторами. Также более мощные и быстроходные двигатели СТД 630-2 имеют меньшие, по сравнению с СД 12-46-8, относительные потери активной мощности на генерацию реактивной, как в режиме работы с номинальным значением реактивной мощности, так и с допустимой перегрузкой по реактивной мощности при снижении коэффициента загрузки. Поэтому в дальнейшем расчете рассматриваем вариант с использованием СД только в приводе компрессорных установок (вариант 2). В вариантах 1-3 потребляемая реактивная мощность превышает экономическое значение, т.е. данная РМ должна быть скомпенсирована дополнительно установленными конденсаторными батареями.

### 3.4 Расчет и сравнение приведенных затрат на компенсацию реактивной мощности синхронными двигателями и конденсаторными батареями 6 кВ

В данном разделе определим оптимальную величину генерируемой синхронными двигателями реактивной мощности.

Предположим, что компенсирующая способность синхронных двигателей будет использоваться в часы максимума нагрузки, т.е. с 8-11 и 13-17 часов. Тогда рассчитаем приведенные затраты при использовании всей располагаемой мощности СД и затраты при использовании конденсаторных батарей 6 кВ.

Приведенные затраты на генерирование реактивной мощности ВКБ определяем по формуле

$$Z_{1\text{вкб}} = (K_{\text{уд}} \cdot p + \Delta P_{\text{ВКБ}} \cdot C_{\text{ЭЭ}} \cdot T) \cdot Q,$$

где  $K_{\text{уд}}$  – удельная стоимость 1 кВАр ВКБ 6кВ, у.е./кВАр [4, с.167];

$p = 0,225$  – суммарные годовые отчисления на ВКБ [9, с.32];

$\Delta P_{\text{ВКБ}}$  - удельные потери активной мощности на 1 кВАр генерируемой ВКБ реактивной мощности, кВт/кВАр [4, с.167];

$T$  – время включения, ч.

Приведенные затраты на выработку реактивной мощности синхронными двигателями рассчитываем по формуле

$$Z_{\text{сд}} = \left[ \left( \frac{D_1 \cdot Q}{Q_{\text{сдном}}} \right) + \left( \frac{D_2 \cdot Q^2}{n_{\text{сд}} \cdot Q_{\text{сдном}}^2} \right) \right] \cdot C_{\text{ЭЭ}} \cdot T$$



При использовании располагаемой мощности двух синхронных двигателей  $Q_{сд} = 634,54$  кВАр в течение 7 часов годовые приведенные затраты составят

$$Z_{сд} = \left[ \left( \frac{2,95 \cdot 634,54}{317,27} \right) + \left( \frac{2,22 \cdot 634,54^2}{2 \cdot 317,27^2} \right) \right] \cdot 0,02 \cdot 2555 = 528,4 \text{ у. е./год}$$

Приведенные затраты на установку и использование ВКБ эквивалентной мощности

$$Z_{1вкб} = (0,225 \cdot 4,9 + 0,003 \cdot 0,02 \cdot 2555) \cdot 634,54 = 797 \text{ у. е./год}$$

Так как годовые затраты при использовании для КРМ синхронных двигателей получились меньше затрат ВКБ, следовательно, при заданных условиях, использование всей располагаемой мощности установленных СД экономически оправдано, чем установка ВКБ сопоставимой мощности. К тому же для установки конденсаторных батарей 6 кВ требуется ячейка КРУ, следовательно приведенные затраты увеличатся на постоянную величину не зависящую от реактивной мощности равную

$$Z_{0вкб} = p_{кру} K_0,$$

где  $K_0 = 2300$  у. е. – затраты на ячейку КРУ 6 кВ для ВКБ [1, с.331];

$p_{кру} = 0,193$  – суммарные отчисления на распреедустройства и силовое оборудование [9, с.32].

Суммарные приведенные затраты на ВКБ

$$Z_{вкб} = Z_{0вкб} + Z_{1вкб} = 0,193 \cdot 2300 + 797 = 1240,9 \text{ у. е./год}$$

Синхронные двигатели также имеют постоянную часть затрат включающую стоимость регулятора возбуждения, но в связи с отсутствием данных по стоимости, примем допущение, что затраты на регулятор входят в стоимость двигателя, т.е. для данного сравнения  $Z_{осд} = 0$ .

Определяем мощность компенсирующих устройств, необходимую для доведения коэффициента мощности до нормативной величины в режиме максимума нагрузки

$$Q_{\text{ВКБ}} = \Sigma Q_{\text{нагр}} - Q_{\text{СД}} - Q_{\text{эк.мах}} = (Q_{\text{нн+бк}} + Q_{\text{вн}} + \Delta Q_{\text{ц.тр.}} + \Delta Q_{\text{кл}}) - Q_{\text{СД}} - 0,24 \cdot P_{\text{р}}^{\text{мах}}$$

$$Q_{\text{ВКБ}} = (2227 + 1262,28 + 341,1 + 3) - 634,54 - 0,24 \cdot 7535,87 = 1390,23 \text{ кВАр}$$

Вся асинхронная высоковольтная нагрузка подключена к шинам распределительного устройства цеха №3 (РУ1 на схеме), поэтому выбираем ВКБ и равномерно распределяем их по секциям РУ1.

Подобранные батареи конденсаторов указаны в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Высоковольтные конденсаторные батареи

Тип	Расположение	$U_{\text{ном}}$ , кВ	Количество	$Q_{\text{бк}}$ , кВАр
УКЛ56-6,3-450 УЗ	РУ1 (1,2 секции)	6,3	2	450
УКЛ56-6,3-225 УЗ		6,3	2	225
Всего			4	1350

Далее рассчитываем суточное потребление активной и реактивной энергии предприятием с учетом полной компенсации реактивной мощности до нормативного значения. Регулирование генерирования реактивной мощности, в соответствии с графиком нагрузки, производим изменением величины выдаваемой реактивной мощности синхронными двигателями в пределах допустимых значений по перегрузке (таблица 3.14). Мощность установленных конденсаторных батарей (6 и 0,4 кВ) не регулируется, т.к. применение регулируемых многоступенчатых конденсаторных установок для полной компенсации РМ до нормативного значения может приводить к перекомпенсации или недокомпенсации по причине дискретности регулирования. Кроме этого будет значительное удорожание в виду необходимости установки ячеек КРУ, кабельных линий и регулирующей аппаратуры.

### 3.5 Уточнение баланса реактивной мощности и регулирование реактивной мощности по графику нагрузки

Таблица 3.19 – График выдачи реактивной мощности синхронными двигателями компрессорных установок

Ступень графика	$\Delta t, \text{ч}$	$k_{\text{загр}}$	$P_{\text{СД}}, \text{кВт}$	$\Delta P_{\text{СД}}, \text{кВт}$	$\alpha_m$	$Q_{\text{СД}}, \text{кВАр}$	$\Sigma V_{\text{СД}}, \text{кВАр} \cdot \text{ч}$	$\Sigma \Delta W_p, \text{кВт} \cdot \text{ч}$
0-6	6	0,5	659,58	0,041	0,007	4,43	26,58	0,246
6-7	1	0,6	787,28	0,25	-0,04	-26,2	-26,2	0,25
7-8	1	0,8	1044,46	0,94	0,14	91,62	91,62	0,94
8-11	3	0,8	1055,08	11,3	1,06	674,52	2023,56	33,9
11-12	1	0,75	981,6	2,076	0,29	183,38	183,38	2,076
12-13	1	0,75	980,54	1,02	0,15	98,04	98,04	1,02
13-17	4	0,8	1055,08	11,3	1,06	674,52	2698,08	45,2
17-19	2	0,6	795,46	7,79	0,82	518,6	1037,2	15,58
19-20	1	0,6	796,1	8,42	0,86	548,6	548,6	8,42
20-21	1	0,6	797,08	9,36	0,93	591,78	591,78	9,36
21-22	1	0,5	669,82	10,05	0,98	622,24	622,24	10,05
22-24	2	0,5	659,58	0,041	0,007	4,43	8,86	0,082
Суточная выработка реактивной энергии							7903,74	127,124

Таблица 3.20 – Суточный баланс активной мощности и потребление активной энергии предприятием при полной компенсации РМ до нормативного значения

Ступень графика	$\Delta t, \text{ч}$	$P_{\text{нн}}, \text{кВт}$	$P_{\text{СД}}, \text{кВт}$	$P_{\text{Ад}}, \text{кВт}$	$\Delta P_{\text{ц.тр.}}, \text{кВт}$	$\Delta P_{\text{кл.}}, \text{кВт}$	$\Sigma P_p, \text{кВт}$	$\Sigma W_p, \text{кВт} \cdot \text{ч}$
0-6	6	3600,98	659,58	795,9	40,18	8,41	5105,05	30630,3
6-7	1	3600,98	787,28	795,9	40,18	8,41	5232,75	5232,75
7-8	1	4321,17	1044,46	1603,14	50,68	13,05	7032,5	7032,5
8-11	3	4801,3	1055,08	1603,14	61,47	15,86	7536,85	22610,55
11-12	1	3841,04	981,6	1397,52	44,4	10,9	6275,46	6275,46
12-13	1	4321,17	980,54	1397,52	50,68	12,36	6762,27	6762,27
13-17	4	4801,3	1055,08	1603,14	61,47	15,86	7536,85	30147,4
17-19	2	4081,11	795,46	1194,54	49,16	11,4	6131,67	12263,34
19-20	1	4081,11	796,1	795,9	49,16	10,6	5732,87	5732,87
20-21	1	3841,04	797,08	795,9	46,11	9,91	5490,04	5490,04
21-22	1	3841,04	669,82	795,9	46,11	9,91	5362,78	5362,78
22-24	2	3600,98	659,58	795,9	40,18	8,41	5105,05	10210,1
Суточное потребление активной энергии								147750,36

Таблица 3.21 – Суточное баланс реактивной мощности и потребление реактивной энергии предприятием при полной компенсации РМ до нормативного значения

Степень графика	$\Delta t, \text{ч}$	$Q_{\text{нн+кб}}, \text{кВАр}$	$Q_{\text{Ад}}, \text{кВАр}$	$\Delta Q_{\text{ц.тр.}}, \text{кВАр}$	$\Delta Q_{\text{кл.}}, \text{кВАр}$	$Q_{\text{СД}}, \text{кВАр}$	$Q_{\text{ВКБ}}, \text{кВАр}$	$Q_{\text{эк}} = \Sigma Q_{\text{р}}, \text{кВАр}$	Небаланс	$\Sigma V_{\text{р}}, \text{кВАр} \cdot \text{ч}$
0-6	6	1250,5	1090,32	237,3	1,52	4,43	1350	1225,21	0,00	7351,26
6-7	1	1250,5	1090,32	237,3	1,52	-26,2		1255,86	-0,02	1255,86
7-8	1	1576	1262,28	288,64	2,51	91,62		1687,80	0,01	1687,8
8-11	3	2227	1262,28	341,1	3,00	674,52		1808,84	0,02	5426,52
11-12	1	1576	1204,02	257,7	2,06	183,38		1506,11	0,29	1506,11
12-13	1	1576	1204,02	288,64	2,34	98,04		1622,94	0,02	1622,94
13-17	4	2227	1262,28	341,1	3,00	674,52		1808,84	0,02	7235,36
17-19	2	1901,5	1156,38	280,8	2,12	518,6		1471,60	0,60	2943,2
19-20	1	1901,5	1090,32	280,8	1,90	548,6		1375,89	0,03	1375,89
20-21	1	1901,5	1090,32	265,8	1,77	591,78		1317,61	0,00	1317,61
21-22	1	1901,5	1090,32	265,8	1,77	622,24		1287,07	0,08	1287,07
22-24	2	1250,5	1090,32	237,3	1,52	4,43		1225,21	0,00	2450,42
Суточное потребление реактивной мощности										35460,04

Суточный коэффициент реактивной мощности с учетом компенсации

$$tg\varphi_{\text{сут}} = \frac{\Sigma V_{\text{р}}}{\Sigma W_{\text{р}}} = \frac{35460,04}{147750,36} = 0,24$$

Рассчитаем и сравним приведенные затраты с учетом регулирования реактивной мощности СД и при использовании регулируемых ВКБ

$$Z_{\text{СД}} = C_{\text{ЭЭ}} \cdot \Delta W_{\text{п.сут.}} \cdot 365 = 0,02 \cdot 127,12 \cdot 365 = 928 \text{ у. е./год}$$

$$Z_{\text{ВКБ}} = Z_{\text{ОВКБ}} + Z_{\text{1ВКБ}} \cdot Q + C_{\text{ЭЭ}} \cdot \Delta W_{\text{п.сут.}} \cdot 365 = 443,9 + 744 + 173,1 = 1361 \text{ у. е./год}$$

Затраты на установку и эксплуатацию регулируемых высоковольтных конденсаторных батарей общей мощностью равной располагаемой мощности установленных СД, как показывает расчет, будут превышать приведенные затраты использования реактивной мощности СД для КРМ. Следовательно, в данном случае вариант использования СД с регулированием выработки РМ по графику также является экономически обоснованным.

### 3.6 Оценка экономической эффективности привлечения синхронных двигателей к генерации реактивной мощности

На рисунке 3.3 изображен суточный график реактивной нагрузки предприятия с учетом полной компенсации реактивной мощности до нормативного значения.

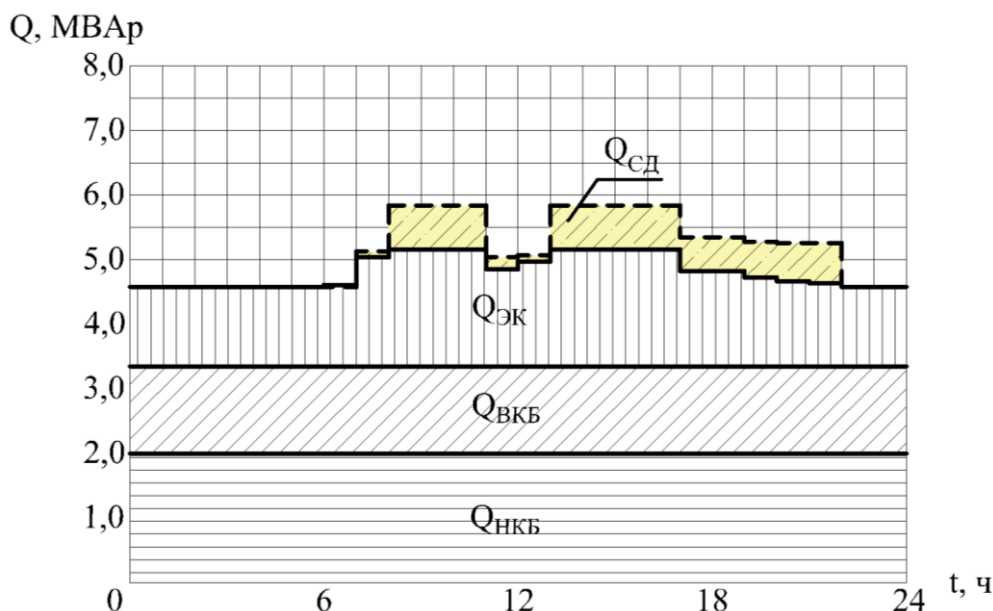


Рисунок 3.3 – График компенсации реактивной мощности

При данном графике за год синхронные двигатели выработают за год

$$V_{\text{СДгод}} = \Sigma V_{\text{СД}} \cdot 365 = 7903,74 \cdot 365 = 2,885 \cdot 10^6 \text{ кВАр} \cdot \text{ч}$$

Уменьшение годовых затрат на оплату потребляемой из сети энергосистемы реактивной энергии определяем по формуле

$$\Delta \Pi_{Q_{\text{СД}}} = b_Q \cdot V_{\text{СДгод}},$$

где  $b_Q$  – ставка тарифа оплаты реактивной энергии, руб./кВАр · ч.

Ставку тарифа оплаты реактивной энергии можно рассчитать по формуле [12]

$$b_Q = 0,08 \cdot b_P,$$

где  $b_P = 0,108$  – ставка тарифа оплаты активной энергии, руб./кВт · ч [15].

$$b_Q = 0,08 \cdot 0,108 = 0,00864 \text{ руб./кВАр} \cdot \text{ч}$$

Определим годовые затраты на покрытие дополнительных активных потерь

$$Z_{\Pi}^{\text{CD}} = b_p \cdot \Sigma \Delta W_{\Pi} \cdot 365 = 0,108 \cdot 127,124 \cdot 365 = 5011 \text{ руб./год}$$

Уменьшение годовых затрат на оплату реактивной энергии

$$\Delta P_{Q_{\text{сд}}} = 0,00864 \cdot 7903,74 \cdot 365 = 24925,2 \text{ руб./год}$$

Экономический эффект от компенсации реактивной мощности синхронными двигателями составит

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \Delta P_{Q_{\text{сд}}} - Z_{\Pi}^{\text{CD}} = 24925,2 - 5011 = 19914,2 \text{ руб./год}$$

#### 4 Расчет режимов работы системы электроснабжения предприятия

Произведем расчет нормального и послеаварийного режимов в RastrWin и оценим влияние синхронных двигателей на уровни напряжения, потери мощности и напряжения, статическую и динамическую устойчивость узла.

##### 4.1 Расчет параметров схем замещения

Для задания параметров трансформаторов в RastrWin занесем каталожные данные трансформаторов ГПП и КТП [1] рассматриваемой СЭС в таблицу паспортных данных трансформаторов, далее при расчете режима программа автоматически рассчитает сопротивления, проводимости и коэффициент трансформации. В таблицу «Анцапфы» задаем пределы регулирования РПН и ПБВ трансформаторов.

Таблица 4.1 – Каталожные данные трансформаторов

Подстанция	Тип	Тип регулятора и пределы регулирования	$S_{\text{ном}}$ , кВА	$U_{\text{ном}}$ ВН/НН, кВ	$u_{\text{кз}}$ , %	$\Delta P_{\text{кз}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I_{\text{хх}}$ , %
ГПП	ТМН-6300/35	РПН $\pm 6 \times 1,5$	6300	35/6,3	7,5	46,5	9,2	0,9
ТП2	ТМ-1600/6	ПБВ $\pm 2 \times 2,5$	1600	6,3/0,4	6,5	18,0	2,8	1,3
ТП1	ТМ-1000/6		1000		5,5	12,2	2,3	1,5
ТП3,5	ТМ-630/6		630		5,5	7,6	1,42	2,0
ТП4	ТМ-400/6		400		4,5	5,9	0,92	2,1

Активные и реактивные сопротивления и емкостные проводимости КЛ рассчитываем по формулам

$$R_{\text{кл}} = r_{\text{уд}} \cdot l, \text{ Ом};$$

$$X_{\text{кл}} = x_{\text{уд}} \cdot l, \text{ Ом};$$

$$B_{\text{кл}} = b_{\text{уд}} \cdot l, \text{ См},$$

где  $r_{\text{уд}}, x_{\text{уд}}$  – удельные активные и индуктивные сопротивления КЛ [1, с. 308], Ом/км;

$b_{\text{уд}}$  – удельные емкостные проводимости КЛ [1, с. 308], См/км · 10<sup>-6</sup>;

$l$  – длина кабельной линии, км.

Таблица 4.2 – Параметры кабельных линий

Назначение линии	Сечение	Удельное активное сопротивление $r_{\text{уд}}, \text{ Ом/км}$	Удельное индуктивное сопротивление $x_{\text{уд}}, \text{ Ом/км}$	Удельная емкостная проводимость $b_{\text{уд}}, \text{ См/км} \cdot 10^{-6}$	Длина линии, км	$R, \text{ Ом}$	$X, \text{ Ом}$	$B, \text{ См} \cdot 10^{-6}$
ГПП-РУ1	150	0,206	0,074	162	0,1	0,02	0,0074	16,2
РУ1-ТП1	50	0,62	0,083	114	0,01	0,0062	0,00083	1,14
РУ1-ТП5	35	0,89	0,087	97,2	0,3	0,267	0,0261	29,16
ГПП-ТП2	70	0,443	0,080	127	0,13	0,0576	0,0104	16,51
ГПП-ТП3	25	1,24	0,091	88	0,12	0,149	0,01	10,56
ГПП-ТП4	25	1,24	0,091	88	0,21	0,26	0,019	18,48
ГПП-М1-М2	35	0,89	0,087	97,2	0,07	0,062	0,0061	6,804
ГПП-М3-М8	25	1,24	0,091	88	0,05	0,062	0,0045	4,4

К ГПП подведены две ВЛ с напряжением 35 кВ. Удельное индуктивное сопротивление и емкостную проводимость ВЛ определяем по формулам

$$x_{\text{0вл}} = 0,144 \cdot \lg \left( \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} \right) + 0,016;$$

$$b_{\text{0вл}} = \frac{7,58}{\lg \left( \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} \right)} \cdot 10^{-6},$$

где  $D_{\text{ср}}$  – среднегеометрическое расстояние между проводами, м;

$r_{\text{пр}}$  – радиус провода, см.

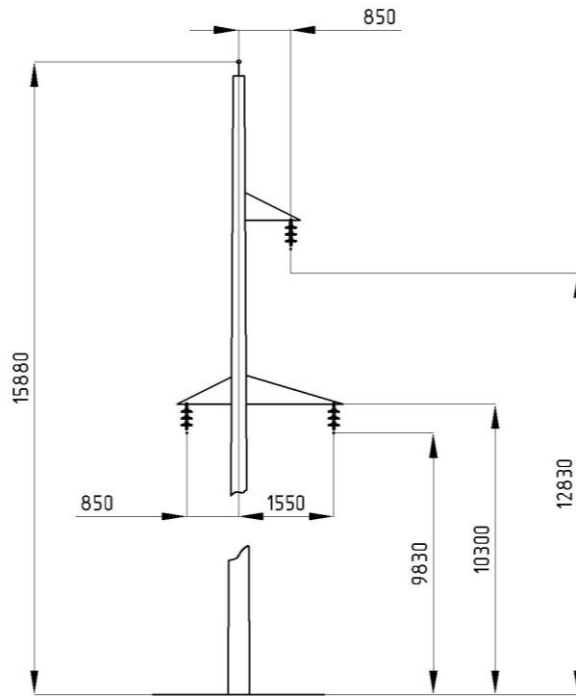


Рисунок 4.1 – Расположение проводов на опоре ПБ35-3В

Определим среднегеометрическое расстояние между проводами для одноцепной опоры ПБ35-3В (рисунок 4.1)

$$D_{\text{cp}} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}$$

$$D_{12} = \sqrt{(12,83 - 9,83)^2 + (1,55 - 0,85)^2} = 3,08 \text{ м};$$

$$D_{23} = \sqrt{(12,83 - 9,83)^2 + (2 \cdot 0,85)^2} = 3,45 \text{ м};$$

$$D_{13} = 1,55 + 0,85 = 2,4 \text{ м};$$

$$D_{\text{cp}} = \sqrt[3]{3,08 \cdot 2,4 \cdot 3,45} = 2,943 \text{ м}$$

Удельное индуктивное сопротивление и емкостная проводимость

$$x_{0\text{ВЛ}} = 0,144 \cdot \lg\left(\frac{2943}{11,4}\right) + 0,016 = 0,363$$

$$b_{0\text{ВЛ}} = \frac{7,58}{\lg\left(\frac{2943}{11,4}\right)} \cdot 10^{-6} = 3,143 \cdot 10^{-6}$$



Таблица 4.3 – Параметры ВЛ

Провод	Наружный диаметр провода, мм	Удельное активное сопротивление г, Ом/км	Удельное индуктивное сопротивление х, Ом/км	Удельная емкостная проводимость b, См/км · 10 <sup>-6</sup>	Длина линии, км	R, Ом	X, Ом	B, См · 10 <sup>-6</sup>
АС70/11	11,4	0,429	0,363	3,143	6	2,57	2,178	18,86

Реактивную мощность, генерируемую конденсаторными батареями, задаем через проводимость, которую рассчитываем по формуле

$$b_{кб} = -\frac{Q_{кб}}{U_{НОМ}^2}, \text{См}$$

Таблица 4.4 – Проводимости конденсаторных батарей

Тип	Q <sub>кб</sub> , кВАр	U <sub>НОМ</sub> , кВ	b <sub>кб</sub> , См
УКЛ56-6,3-450 УЗ	450	6,3	-12,5
УКЛ56-6,3-225 УЗ	225	6,3	-6,25
КРМ-0,4-200	200	0,4	-1385
КРМ-0,4-100	100	0,4	-692,5

N	Название	Тип	U <sub>В</sub>	U <sub>Н</sub>	S <sub>НОМ</sub>	dP <sub>xx</sub>	I <sub>xx</sub>	Uк <sub>ВН</sub>	dP <sub>кз(В-Н)</sub>
1	ТМН6300-1	2х-обм	35 000	6 300,0	6 300	9 200,0	0,90	7,5	46 500,0
2	ТМН6300-2	2х-обм	35 000	6 300,0	6 300	9 200,0	0,90	7,5	46 500,0
3	ТМ1600-1	2х-обм	6 300	400,0	1 600	2 800,0	1,30	6,5	18 000,0
4	ТМ1600-2	2х-обм	6 300	400,0	1 600	2 800,0	1,30	6,5	18 000,0
5	ТМ1000-1	2х-обм	6 300	400,0	1 000	2 300,0	1,50	5,5	12 200,0
6	ТМ1000-2	2х-обм	6 300	400,0	1 000	2 300,0	1,50	5,5	12 000,0
7	ТМ630-1	2х-обм	6 300	400,0	630	1 420,0	2,00	5,5	7 600,0
8	ТМ630-2	2х-обм	6 300	400,0	630	1 420,0	2,00	5,5	7 600,0
9	ТМ630-3	2х-обм	6 300	400,0	630	1 420,0	2,00	5,5	7 600,0
10	ТМ400-1	2х-обм	6 300	400,0	400	920,0	2,10	4,5	5 900,0

Рисунок 4.2 – Таблица задания паспортных данных трансформаторов

	N <sub>bd</sub>	ЕИ	+/-	Тип	Место	К...	V <sub>нр</sub>	V <sub>рег</sub>	N <sub>анц</sub>	Шаг	N <sub>анц</sub>	Шаг
1	1	%	+	РПН	НН	1	35 000,0	6 300,0	6	-1,500	6	1,500
2	2	%	-	ПБВ	НН	1	6 300,0	400,0	2	-2,500	2	2,500

Рисунок 4.3 – Таблица ввода параметров регулирования РПН и ПБВ

## 4.2 Статические характеристики нагрузки

С помощью моделей в Matlab Simulink получим статические характеристики рассматриваемых моделей двигателей для последующего задания их в RastrWin для исследования устойчивости СЭС. Для этого будем снимать значения активной и реактивной мощности двигателей при изменяющемся напряжении питания. Результаты сведены в таблицы 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5 – Статические характеристики асинхронного двигателя АД2 АЗМ1-630/6000УХЛ4 (коэффициент загрузки  $k_3 = 0,8$ )

$U/U_{\text{ном}}$	$P_{\text{дв}}$ , кВт	$Q_{\text{дв}}$ , кВАр
0,75	539,73	302,62
0,8	534,81	276,67
0,9	528,76	255,95
1,0	525,12	256,73
1,1	522,72	270,02
1,2	521,06	292,03
1,3	519,9	320,8
1,4	519,08	355,2
1,5	518,51	394,54
1,6	518,14	438,35

Таблица 4.6 – Статические характеристики асинхронного двигателя А4-400У-8У3 (коэффициент загрузки  $k_3 = 0,8$ )

$U/U_{\text{ном}}$	$P_{\text{дв}}$ , кВт	$Q_{\text{дв}}$ , кВАр
0,68	287,21	203,8
0,7	283,65	194
0,8	274,06	179,88
0,9	269,61	189,5
1,0	267,19	210,38
1,1	265,87	238,83
1,2	265,23	273,22
1,3	265,06	312,72
1,4	265,25	356,82
1,5	265,71	405,22

Критические напряжения при заданной нагрузке двигателей ( $k_3 = 0,8$ ) по результатам моделирования для АД2 АЗМ1-630/6000УХЛ4  $U_{\text{кр}} = 0,74 \cdot U_{\text{ном}} = 4440$  В и для А4-400У-8У3  $U_{\text{кр}} = 0,67 \cdot U_{\text{ном}} = 4020$  В.

Для того чтобы задать статические характеристики в RastrWin необходимо полученные данные аппроксимировать полиномом 4 степени.

$$P(V) = P_{\text{НОМ}} \left[ a_0 + a_1 \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right) + a_2 \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 + a_3 \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^3 + a_4 \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^4 \right]$$

$$Q(V) = Q_{\text{НОМ}} \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right) + b_2 \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 + b_3 \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^3 + b_4 \left( \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^4 \right]$$

Для определения коэффициентов аппроксимации интерполируем полученные данные в MathCad полиномом 4 степени, коэффициенты которого определяем при помощи функции численного решения линейных систем уравнений (Isolve).

$$\begin{aligned}
 & x := \begin{pmatrix} 0.7 \\ 0.9 \\ 1 \\ 1.1 \\ 1.2 \end{pmatrix} \quad p := \begin{pmatrix} 283.65 \\ 269.61 \\ 267.19 \\ 265.87 \\ 265.23 \end{pmatrix} \quad q := \begin{pmatrix} 194 \\ 189.5 \\ 210.38 \\ 238.83 \\ 273.22 \end{pmatrix} \\
 & D := \begin{bmatrix} 1 & x_0 & (x_0)^2 & (x_0)^3 & (x_0)^4 \\ 1 & x_1 & (x_1)^2 & (x_1)^3 & (x_1)^4 \\ 1 & x_2 & (x_2)^2 & (x_2)^3 & (x_2)^4 \\ 1 & x_3 & (x_3)^2 & (x_3)^3 & (x_3)^4 \\ 1 & x_4 & (x_4)^2 & (x_4)^3 & (x_4)^4 \end{bmatrix} \\
 & a := \text{Isolve}(D, p) \quad b := \text{Isolve}(D, q) \\
 & \frac{a}{267.19} = \begin{pmatrix} 3.098806 \\ -7.29043 \\ 9.665344 \\ -5.789887 \\ 1.316167 \end{pmatrix} \quad \frac{b}{210.38} = \begin{pmatrix} 10.9190512 \\ -37.1688294 \\ 50.1274281 \\ -29.6233799 \\ 6.7457299 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 4.4 – Определение коэффициентов полинома 4 степени в MathCad (А4-400У-8У3)

Таблица 4.7 – Коэффициенты полиномов СХН

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
АТД2 АЗМ1-630/6000УХЛ4									
2,026	-3,298	4,0054	-2,1740	0,4408	16,435	-51,459	63,035	-33,879	6,867
А4-400У-8У3									
3,099	-7,29	9,665	-5,79	1,316	10,92	-37,17	50,127	-29,623	6,746

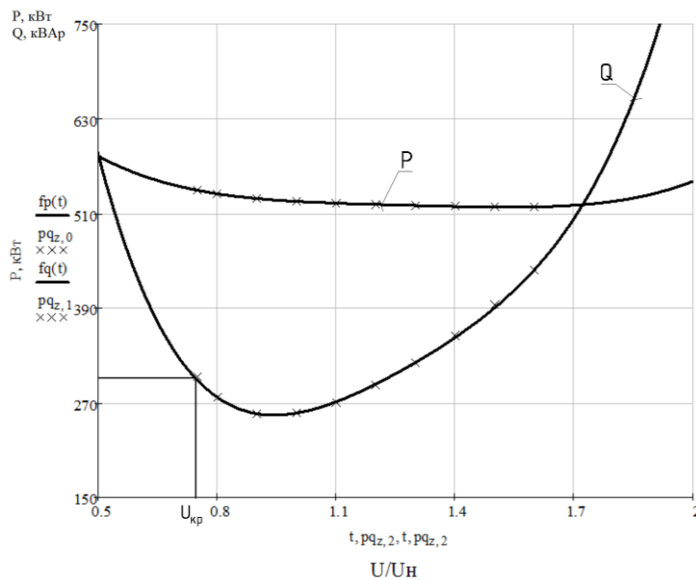


Рисунок 4.5 – Статические характеристики АТД2 АЗМ1-630/6000УХЛ4

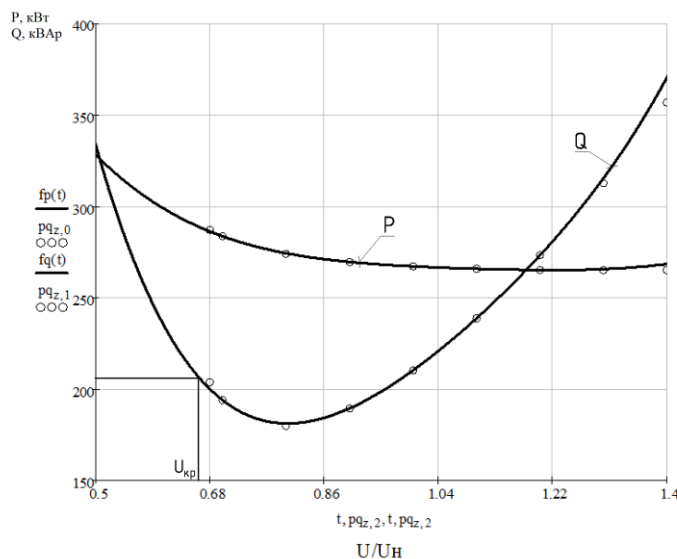


Рисунок 4.6 – Статические характеристики А4-400У-8У3

Статические характеристики обобщенной нагрузки цехов задаем полиномом 3 порядка. Коэффициенты типовой статической характеристики обобщенной нагрузки на стороне 6-10 кВ указаны в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Коэффициенты полинома СХН 6-10 кВ

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$b_0$	$b_1$	$b_2$
0,83	-0,3	0,47	4,9	-10,1	6,2

### **4.3 Отклонения напряжения при нормальном и послеаварийном режимах**

Исследуем СЭС на отклонения напряжения при максимальном режиме работы (в нормальном и послеаварийном режиме) и произведем оценку влияния синхронных двигателей на уровни напряжения. Для этого смоделируем три варианта конфигурации СЭС:

1) Компенсация реактивной мощности только на стороне 0,4 подстанций ТП1,2. Все двигатели 6 кВ асинхронные, компенсация на стороне 6 кВ отсутствует (исходный вариант СЭС предприятия).

2) Компенсация реактивной мощности на стороне 0,4 и 6 кВ. Все двигатели 6 кВ асинхронные.

3) Конденсаторные батареи 0,4 и 6 кВ и синхронные двигатели компрессоров. В нормальном режиме работы сети СД генерируют номинальную располагаемую реактивную мощность, в послеаварийном работают с допустимой перегрузкой (полная компенсация РМ до нормативного значения).

Таблицы параметров режимов по каждому варианту приведены в приложении А. На рисунке 4.8 изображены эпюры отклонений напряжения от шин ПС ЭС 35 кВ до наиболее удаленного электроприемника (нагрузки цеховой подстанции ТП-4) в нормальном и послеаварийном режимах. Регуляторы РПН и ПБВ трансформаторов ГПП и цеховых подстанций установлены на нулевых отпайках.

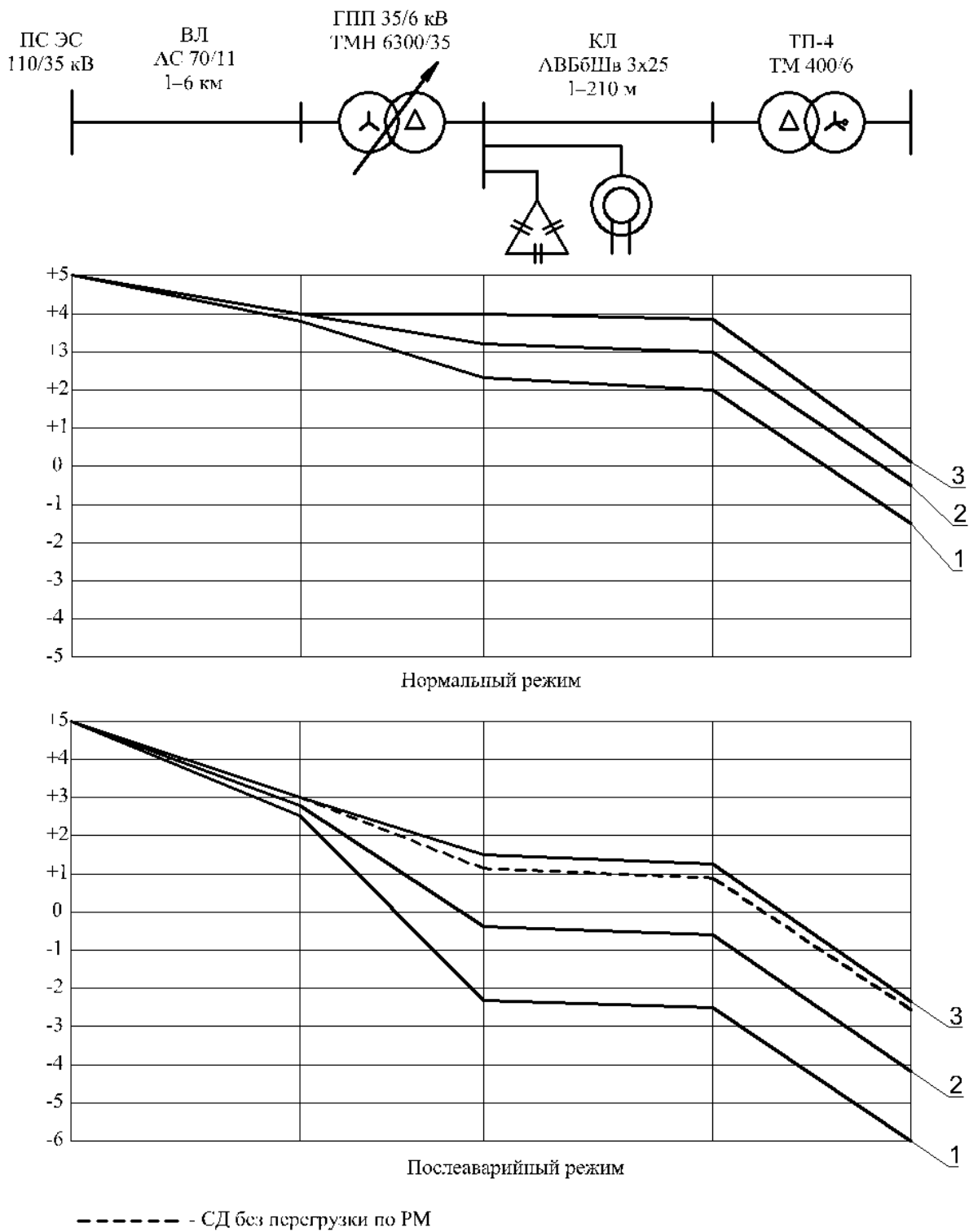


Рисунок 4.7 – Эпюры отклонений напряжения для нормального и послеаварийного режима при компенсации РМ только КБ 0,4 кВ (1), КБ 0,4 кВ и КБ 6 кВ (2) и при компенсации РМ всеми конденсаторными батареями и СД (3)

Таблица 4.9 – Потери в системе электроснабжения предприятия

Вариант	Потери в ВЛ		Потери в трансформаторах ГПП		Потери в КЛ 6 кВ		Потери в цеховых трансформаторах		Суммарные потери	
	$\Delta P_{\text{вл}}$ , кВт	$\Delta Q_{\text{вл}}$ , кВАр	$\Delta P_{\text{гпп}}$ , кВт	$\Delta Q_{\text{гпп}}$ , кВАр	$\Delta P_{\text{кл}}$ , кВт	$\Delta Q_{\text{кл}}$ , кВАр	$\Delta P_{\text{тп}}$ , кВт	$\Delta Q_{\text{тп}}$ , кВАр	$\Sigma \Delta P$ , кВт	$\Sigma \Delta Q$ , кВАр
Нормальный режим										
1	79,3	67,2	63,67	563,9	16,41	2,87	64,97	351,23	224,35	985,2
2	66,86	56,66	56,11	487,3	15,36	2,5	65,4	351,65	203,73	898,11
3	61,63	52,23	54,1	466,86	15,38	2,45	65,5	355,09	196,61	876,63
Аварийный режим										
1	162,46	137,68	100,18	974,07	16,7	2,94	64,33	344,88	343,67	1459,57
2	139,31	118,06	87,38	844,31	15,47	2,51	64,43	346,91	306,59	1311,79
3	124,06	105,14	79,01	759,54	15,82	2,52	64,78	349,82	283,67	1217,02

Таблица 4.10 – Сводная таблица потерь мощности, потерь и отклонений напряжений в СЭС предприятия по вариантам

Показатель	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
	Норм.	П/А	Норм.	П/А	Норм.	П/А
Потери активной мощности $\Sigma \Delta P$ , кВт	224,35	343,67	203,73	306,59	196,61	283,67
Потери реактивной мощности $\Sigma \Delta Q$ , кВАр	985,2	1459,57	898,11	1311,79	876,63	1217,02
Потери напряжения $dU$ , кВ	3,32	3,9	2,66	3,25	2,13	2,61
Максимальные отклонения напряжения $\delta U$ , %	-1,5	-6	-0,55	-4,11	-0,2	-2,3
Коэффициент мощности в начале ВЛ $\cos \varphi$	0,84	0,83	0,91	0,9	0,96	0,95

По результатам, приведенным в таблице видно, что использование реактивной мощности синхронных двигателей положительно влияет на уровни напряжения в СЭС предприятия. При условном отсутствии регулирования РПН трансформаторов ГПП использование в СЭС двух СД привода компрессоров генерирующих номинальную РМ в нормальном режиме работы позволяет поддерживать уровень напряжения с максимальным отклонением -0,2% и -2,3% в послеаварийном режиме (при отключении одного трансформатора ГПП) с дополнительной форсировкой. Кроме этого снижаются потери мощности и потери напряжения в СЭС и повышается общий коэффициент мощности.

#### 4.4 Определение запаса статической устойчивости

Исследуем СЭС на статическую устойчивость при утяжелении режима (снижении напряжения на шинах ПС ЭС 35 кВ) при нормальном и послеаварийном режиме работы. Рассмотрим исходный вариант СЭС с компенсацией РМ на стороне 0,4 кВ и асинхронными двигателями (вариант 1), и полной компенсацией РМ конденсаторными батареями 0,4; 6 кВ совместно с СД привода компрессоров (вариант 2). Для определения запаса статической устойчивости и нахождения предельного режима в СЭС в RastrWin будем производить расчет серии установившихся режимов при изменении параметров в соответствии с заданной траекторией утяжеления. Критерием определения предельного режима является сходимость расчета. Дополнительным критерием предельного режима может служить достижение экстремума по отмеченным контролируемым величинам (мощности по сечениям, потерям, напряжениям и т.д.).

По результатам расчета утяжеления определим коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению

$$K_U = \frac{U - U_{кр}}{U},$$

где  $U$  - напряжение в рассматриваемом режиме (при начальных условиях), В;

$U_{кр}$  - критическое напряжение в том же узле, соответствующее границе, ниже которой происходит нарушение статической устойчивости, В.

Коэффициенты запаса статической устойчивости должны быть не ниже значений, указанных в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Нормируемые коэффициенты запаса устойчивости напряжению

Режим	Минимальные коэффициенты запаса по напряжению
Нормальный	0,15
Утяжелённый	0,15
Аварийный	0,1



Таблица 4.12 – Результаты расчета утяжеления режима для варианта 1

Шаг утяжеления	U, кВ	Q, кВАр	U, кВ	Q, кВАр
	Нормальный режим		Аварийный режим	
	6119,94	2936	5975,5	2839
1	5947,46	2826	5795,94	2761
2	5773,09	2757	5610,55	2738
3	5596,37	2735	5418,68	2770
4	5416,45	2773	5216,89	2879
5	5232,92	2872	5001,3	3088
6	5045,05	3038	4941,33	3164
7	4850,86	3297	–	–
8	4647,04	3689	–	–

Коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению для варианта 1

$$K_U^H = \frac{6119,94 - 4647,04}{6119,94} = 0,24$$

$$K_U^{ав} = \frac{5975,5 - 4941,33}{5975,5} = 0,17$$

Таблица 4.13 – Результаты расчета утяжеления режима для варианта 2

Шаг утяжеления	U, кВ	Q, кВАр	U, кВ	Q, кВАр
	Нормальный режим		Аварийный режим	
	6234,96	1875	6087,62	1543
1	6062,7	1741	5913,44	1446
2	5888,38	1655	5735,3	1391
3	5712,34	1604	5552,38	1381
4	5533,83	1602	5361,78	1438
5	5352,42	1650	5163,76	1554
6	5166,83	1769	4951,76	1774
7	4976,63	1954	4720,53	2125
8	4779,94	2231	4619,86	2310
9	4574,43	2618	–	–
10	4352,92	3206	–	–
11	4103,29	4118	–	–

Коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению для варианта 2

$$K_U^H = \frac{6234,96 - 4103,29}{6234,96} = 0,34$$

$$K_U^{ав} = \frac{5975,5 - 4941,33}{5975,5} = 0,17$$

Статические характеристики узла нагрузки 6 кВ (шины ГПП) СЭС предприятия показаны на рисунке 4.8, где  $U_{кр.н.1}, U_{кр.н.2}$  – критические напряжения при нормальном режиме для вариантов 1 и 2,  $U_{кр.ав.1}, U_{кр.ав.2}$  – критические напряжения при аварийном режиме (в работе 1 трансформатор ГПП) для вариантов 1 и 2.

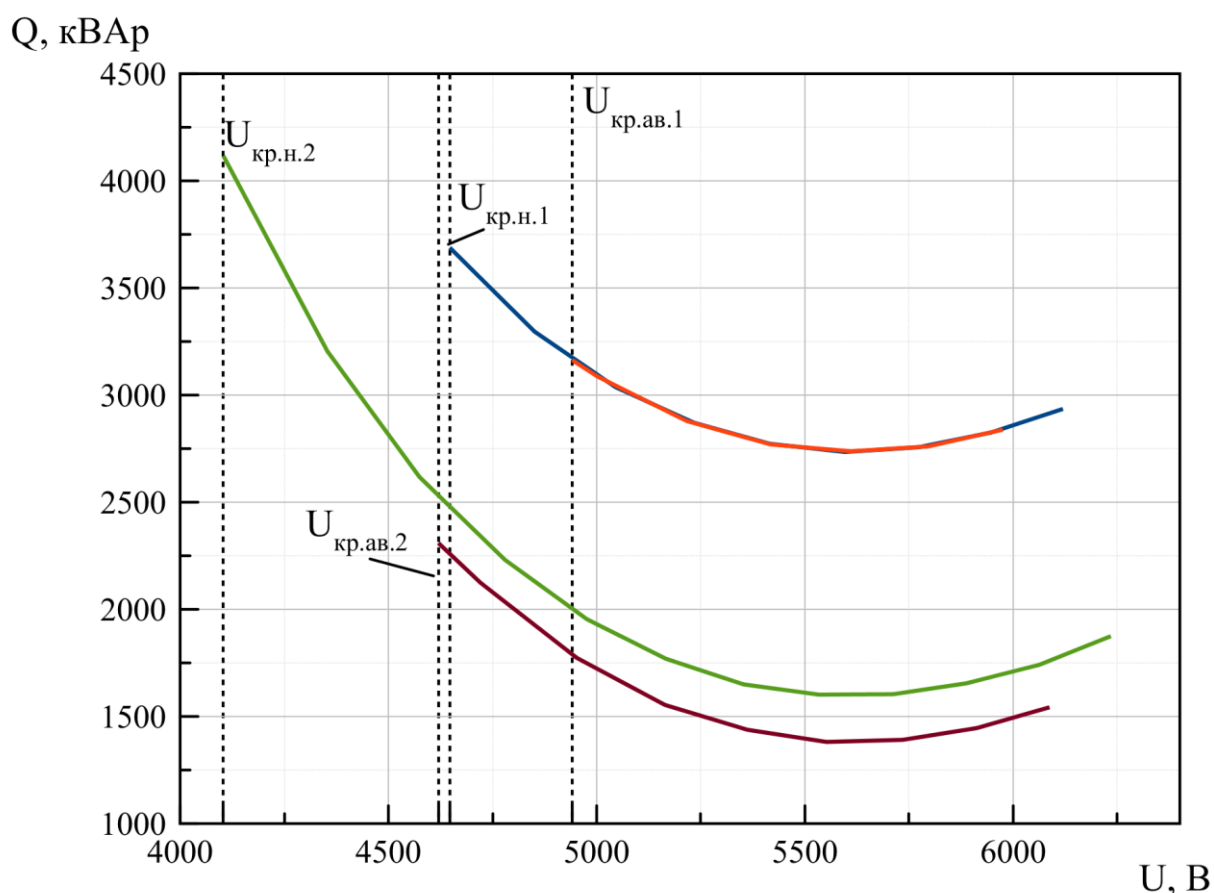


Рисунок 4.8 – Статические характеристики устойчивости СЭС предприятия при утяжелении режима

Из полученных результатов видно, что при использовании в качестве привода компрессоров СД генерирующих номинальную РМ, увеличивается запас статической устойчивости СЭС предприятия в нормальном и в аварийном режимах, в отличие от варианта использования АД.

## 4.5 Исследование динамической устойчивости

В данном разделе исследуем СЭС предприятия на динамическую устойчивость при использовании в приводе компрессоров синхронных двигателей. Исследование на динамическую устойчивость произведем в программе Mustang, для наиболее тяжелого режима - при трехфазном КЗ на ВЛ 35 кВ.

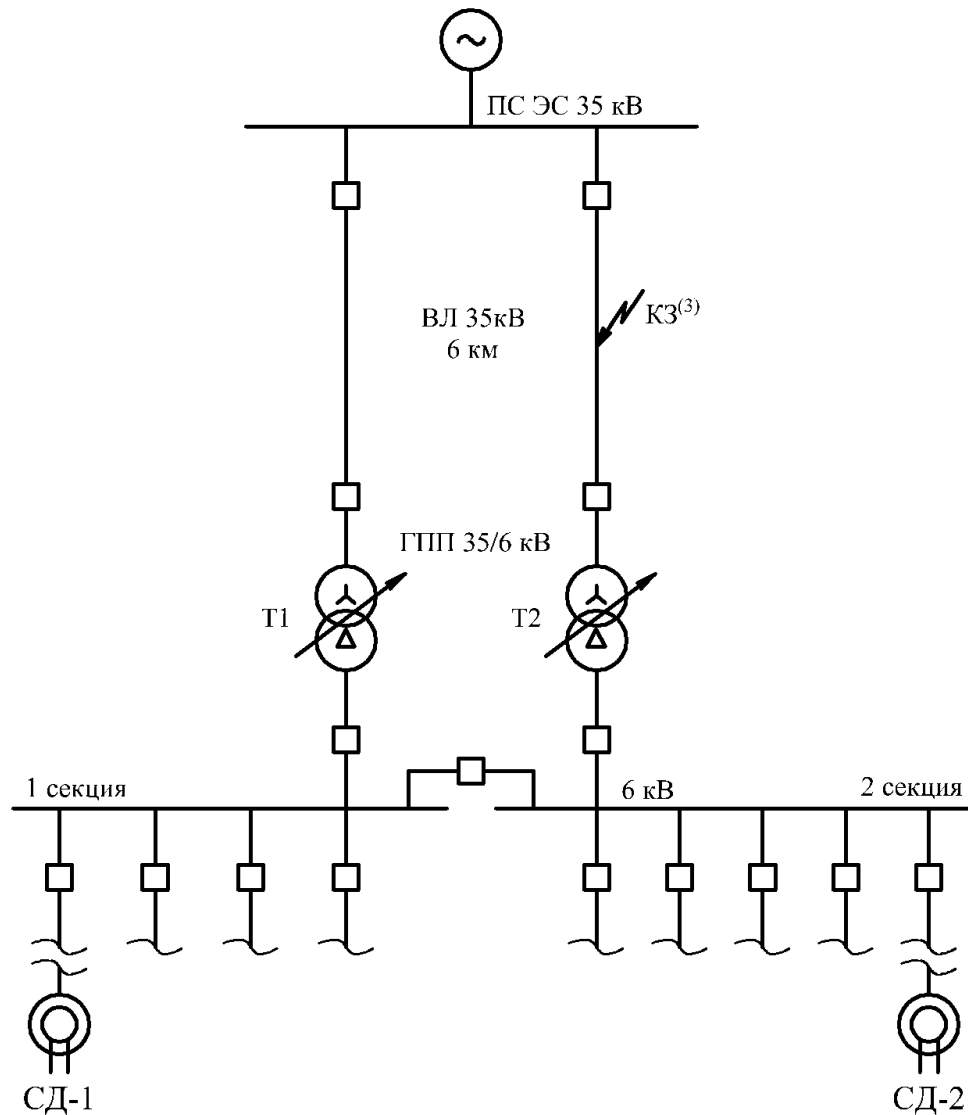


Рисунок 4.9 – Схема места возникновения короткого замыкания

Значения выдержек времени устройств РЗиА приведены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Исходные данные выдержек по времени

Выдержка защиты, $t_{0.3}$ , с.	АПВ ВЛ $t_{АПВ}$ , с.	Выключатель 35 кВ		Выключатель секционный 6 кВ	
		$t_{ВЫКЛ}$ , с.	$t_{ВКЛ}$ , с.	$t_{ВЫКЛ}$ , с.	$t_{ВКЛ}$ , с.
0,12	3,0	0,055	0,062	0,055	0,12

1) Для узлов содержащих АД задаем динамические характеристики нагрузки в таблицу характеристик СХН/ДХН Mustang. Данные по пусковым характеристикам АД берем из справочника [8].

СХН		ДХН													
Тип	Вид	Тдв	Дас	Cos(φ)	Кзаг	Мст	Мтрог	Ки	Удв/Ун	Ммах	Мпуск	Тпуск	Сденом	Ст/Рст	
1	1	0.800	0.550	0.830	0.800	0.500	0.100	4.000	1.000	1.900	1.000	5.000	1.730	70.000	
2	1	0.800	0.550	0.900	0.800	0.700	0.100	4.000	1.000	1.900	1.100	5.200	1.000	70.000	

Рисунок 4.10 – Таблица задания динамических характеристик АД

2) В таблице параметров генераторов задаем характеристики балансирующего узла и синхронных двигателей. Параметры синхронных двигателей СТД-630-2 взяты из справочника [11].

Механическая постоянная инерции СД вместе с механизмом рассчитывается по формуле

$$M_j = T_j \cdot K_M \cdot P_{\text{ном.дв.}}$$

где  $T_j = 2,1$  – механическая постоянная инерции СД без механизма (определяется по справочным данным), с;

$K_M$  – коэффициент характеризующий инерционность приводного механизма ( $K_M = 3 \div 6$  для турбокомпрессоров);

$P_{\text{ном.дв.}}$  – номинальная мощность двигателя, МВт.

$$M_j = 2,1 \cdot 5 \cdot 0,63 = 6,61 \text{ МВт} \cdot \text{с}$$

Генераторы		РС	РВ	Возбудители		СД	Форсировка						
Название	N	Блок	Uгном	Ргном	COS(φ)	D	Mj/Tj	X'd	Xd	Xq	X''d	X''q	T'd0
ПС ЭС	1		35000					0.280					
СД1	6		6000.0	-630	0.900		6.61	0.227	1.810	1.810	0.147	0.147	2.510
СД2	15		6000.0	-630	0.900		6.61	0.227	1.810	1.810	0.147	0.147	2.510
ПС ЭС2	48		35000					0.280					

Рисунок 4.11 – Параметры балансирующего узла и СД

Генераторы		РС	РВ	Возбудители		СД	Форс
N	D(p)	COS(φ)	M(ст)	dMстарт			
6	0.800	0.855	0.100	0.745			
15	0.800	0.855	0.100	0.745			

Рисунок 4.12 – Параметры СД

3) Согласно данным справки к ПО Mustang устанавливаем параметры регуляторов возбуждения СД и возбудителей.

Генераторы		РС	РВ	Возбудители		СД	Форсировка				
N	Трв	Урв+	Урв-	Ku	K'u	K'if	Kf	K'f	Tf		
6	0.040	6.000	-6.000	50.000	5.000	5.000	2.000	5.000	0.900		
15	0.040	6.000	-6.000	50.000	5.000	5.000	2.000	5.000	0.900		

Рисунок 4.13 – Параметры регуляторов возбуждения

Генераторы		РС	РВ	Возбудители		СД	Форсировка		
N	Nф	Nсист	Tв	Eqe+	Eqe-	Eq+	Eq-	K	
6		1	0.040	2.000	-1.600	2.000	0.600		
15		1	0.040	2.000	-1.600	2.000	0.600		

Рисунок 4.14 – Параметры возбудителей

На 1 секунде моделирования происходит трехфазное КЗ на ВЛ 35кВ. В 1,175 срабатывает защита и отключает линию, в тоже время включается секционный выключатель шин ГПП 6кВ. На 4.237 происходит успешное АПВ.

Параметры работы автоматики приведены на рисунке 4.15

Пояснение	N	Логика	Фактор	Ni	Nj	Nп	Уставка	T1
		T2	Действие	Ni	Nj	Nп	Парам1	Парам2
	1		Время					
	1	1.000	Шунт	3				0.001
	1	1.175	Отключить связь	1	3	1.175		
	1	1.175	Включить связь	4	5			
	1	4.237	Шунт	3				-0.001
	2		Время					
	2	4.237	Включить связь	1	3			
	2	4.357	Отключить связь	4	5			

Рисунок 4.15 – Установки автоматики

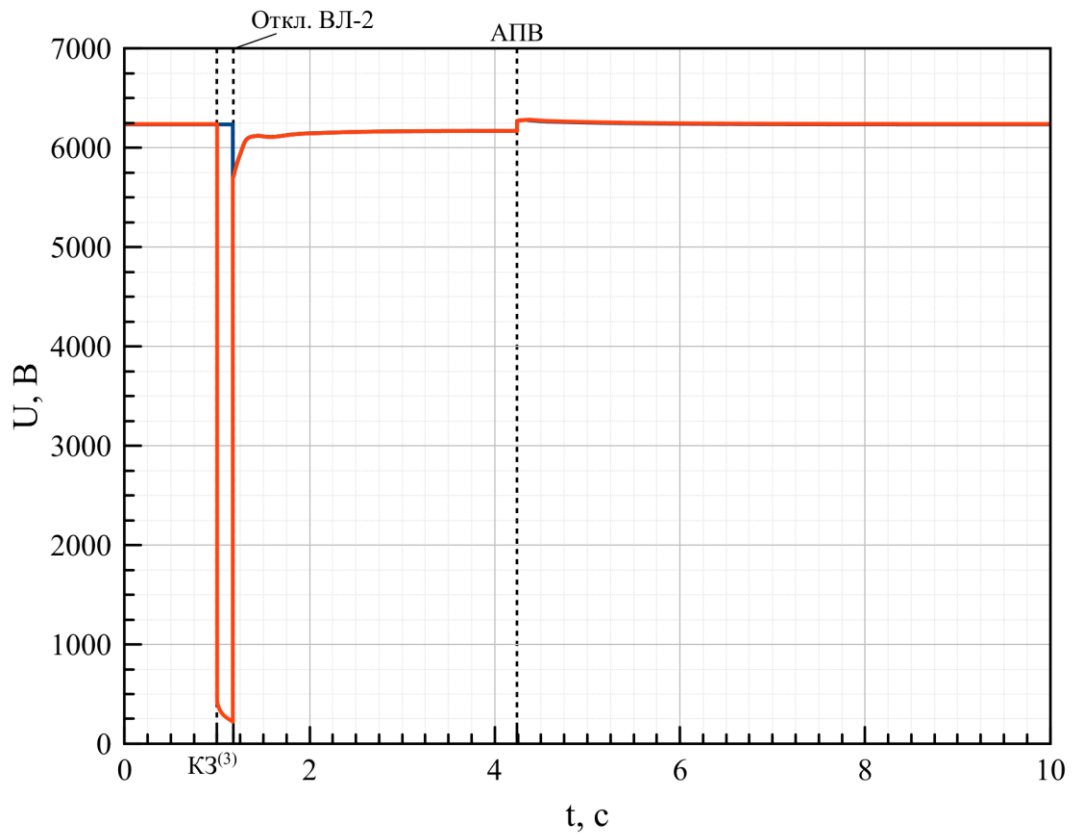


Рисунок 4.16 – Изменение напряжения на шинах ГПП 6 кВ (1,2 секция)

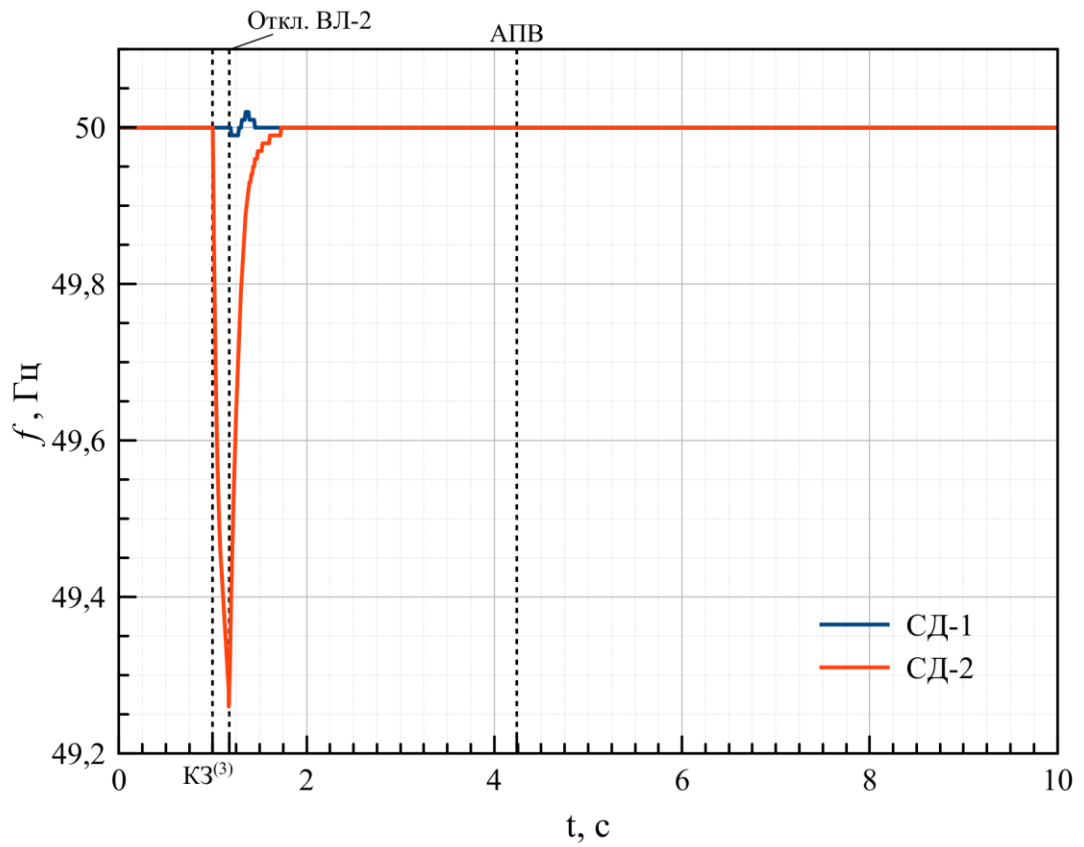


Рисунок 4.17 – Изменение частоты синхронных двигателей (1,2 секция ГПП)

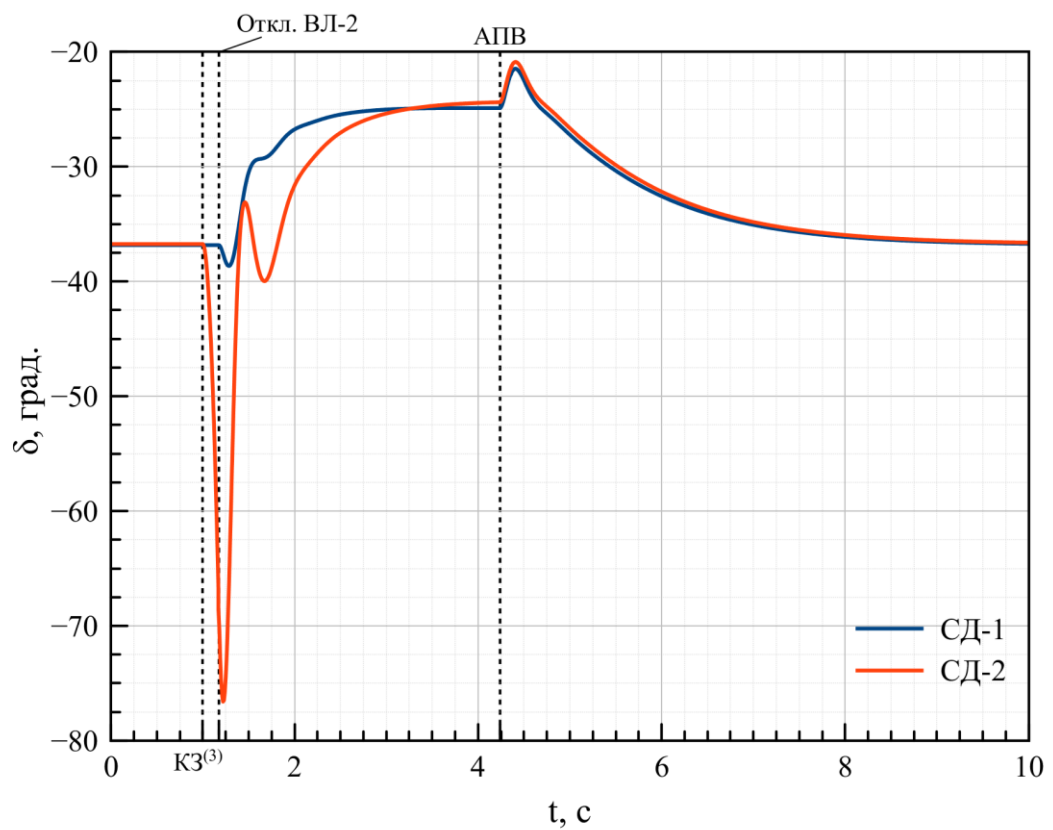


Рисунок 4.18 – Изменение углов роторов СД при трехфазном КЗ (1,2 секция ГПП)

Из полученных результатов видно, что при коротком замыкании на линии 35 кВ максимальный угол нагрузки СД составляет менее  $90^\circ$ , следовательно, двигатель при КЗ двигатель не выпадает из синхронизма. Далее при срабатывании защиты и отключения участка с КЗ угол нагрузки двигателей увеличивается до значения  $25^\circ$  по причине форсировки тока возбуждения. В связи с этим в аварийном режиме напряжение на шинах ГПП поддерживается в пределах нормативного значения  $U_{ав} = 6160$  В. После успешного АПВ, угол нагрузки и ток возбуждения снижаются до значений соответствующих нормальному установившемуся режиму работы до КЗ. Отклонение частоты на шинах ГПП при КЗ достигает  $\delta f = -0,5$  Гц.

Глубина провала напряжения при КЗ составляет

$$\delta U_{пр} = \frac{U_{ном} - U_{min}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{6000 - 229,53}{6000} \cdot 100 = 96,2 \%$$



#### 4.6 Исследование влияния несинусоидальности напряжения на работу конденсаторных батарей и синхронных двигателей

В рассматриваемой системе электроснабжения предприятия присутствуют электроприемники с нелинейными вольтамперными характеристиками, такие как преобразователи частоты, силовые преобразователи, сварочные установки, электролизные установки, газоразрядные лампы. Данные электроприемники потребляют из сети несинусоидальные токи, что приводит к искажению формы кривой напряжения. При этом в линиях электропередач, трансформаторах, электрических машинах и статических конденсаторах высшие гармоники тока вызывают дополнительные потери, т.к. сопротивления этих элементов зависят от частоты. В частности для батарей конденсаторов наличие высших гармоник в сети приводит к увеличению токов гармоник (так как емкостное сопротивление конденсатора зависит от частоты), которые увеличивают потери мощности и могут вызывать перегрузку конденсаторов, что в свою очередь приводит к снижению срока службы и выходу из строя конденсаторов.

Смоделируем работу конденсаторной батареи в сети с различной нагрузкой высшими гармониками. В качестве источника высших гармоник примем нерегулируемый вентильный преобразователь, порядок генерируемых гармоник которого 5,7,11,13 [9, с. 227].

В Matlab Simulink соберем модель сети с включенной конденсаторной батареей 6 кВ мощностью 450 кВАр (рисунок 4.19). Изменяя амплитуду гармоник источника напряжения определим зависимость тока в фазах конденсаторной установки от коэффициента несинусоидальности (определяется блоком THD). Также смоделируем работу синхронного двигателя СТД 630 с коэффициентом загрузки  $P/P_{\text{ном.сд.}} = 1$  и коэффициентом загрузки реактивной мощностью  $Q/Q_{\text{ном.сд.}} = 1$ .

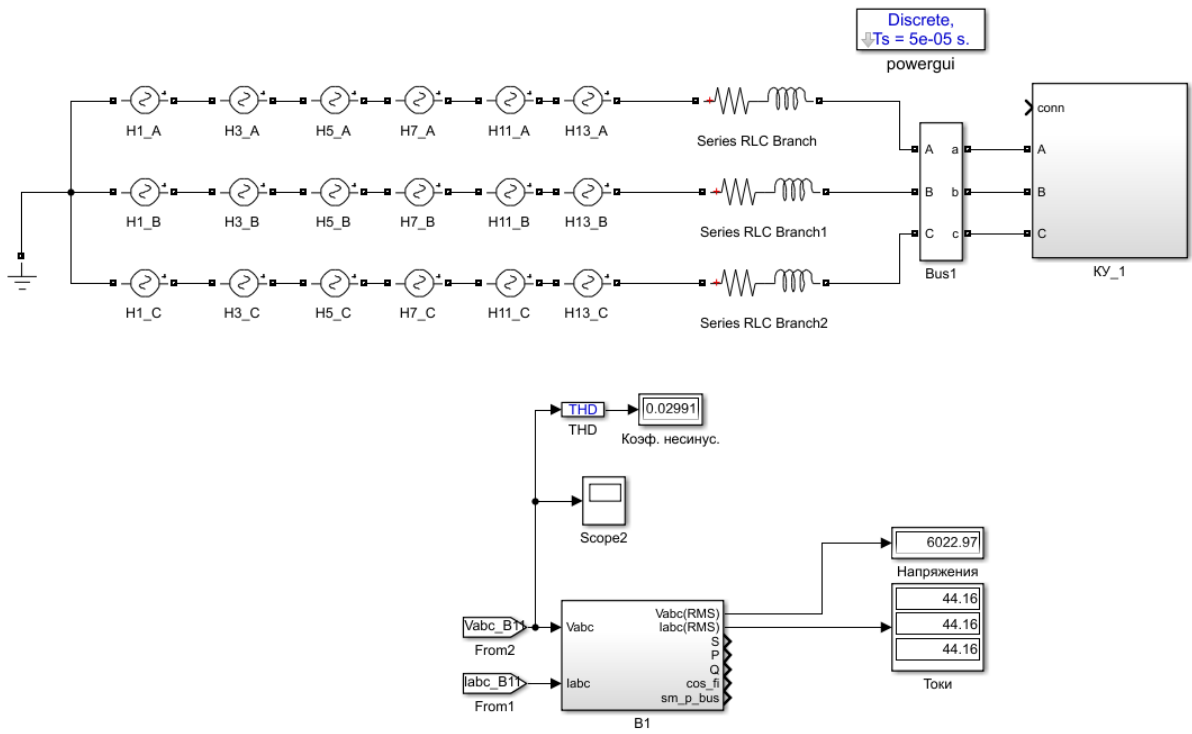


Рисунок 4.19 – Модель сети с несинусоидальностью напряжения с включенной конденсаторной батареей

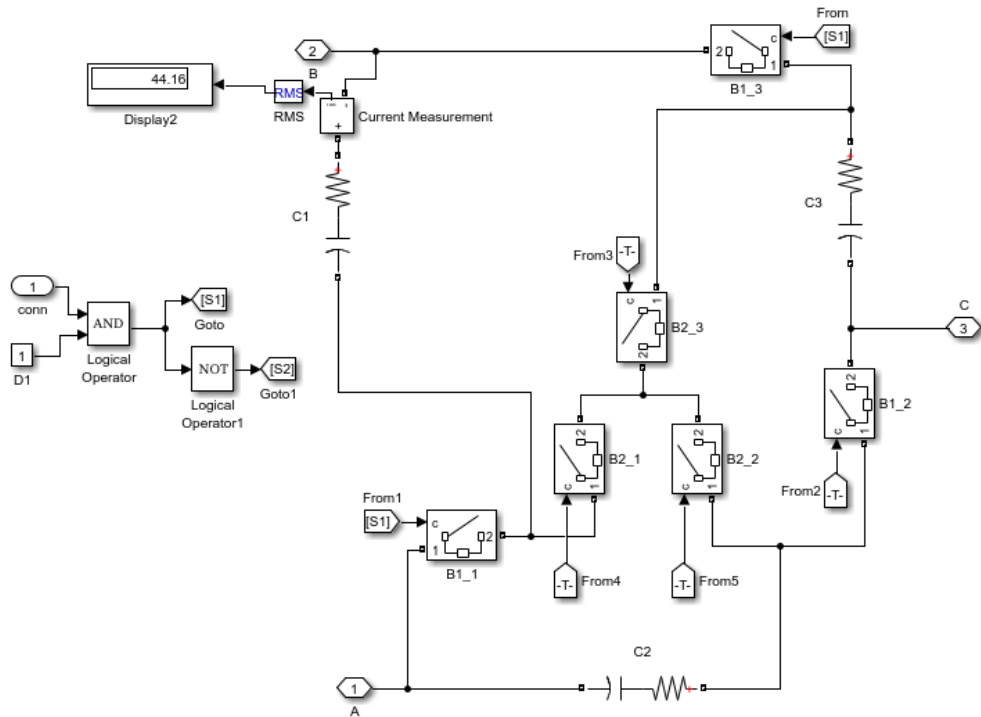


Рисунок 4.20 – Структура подмодели конденсаторной батареи

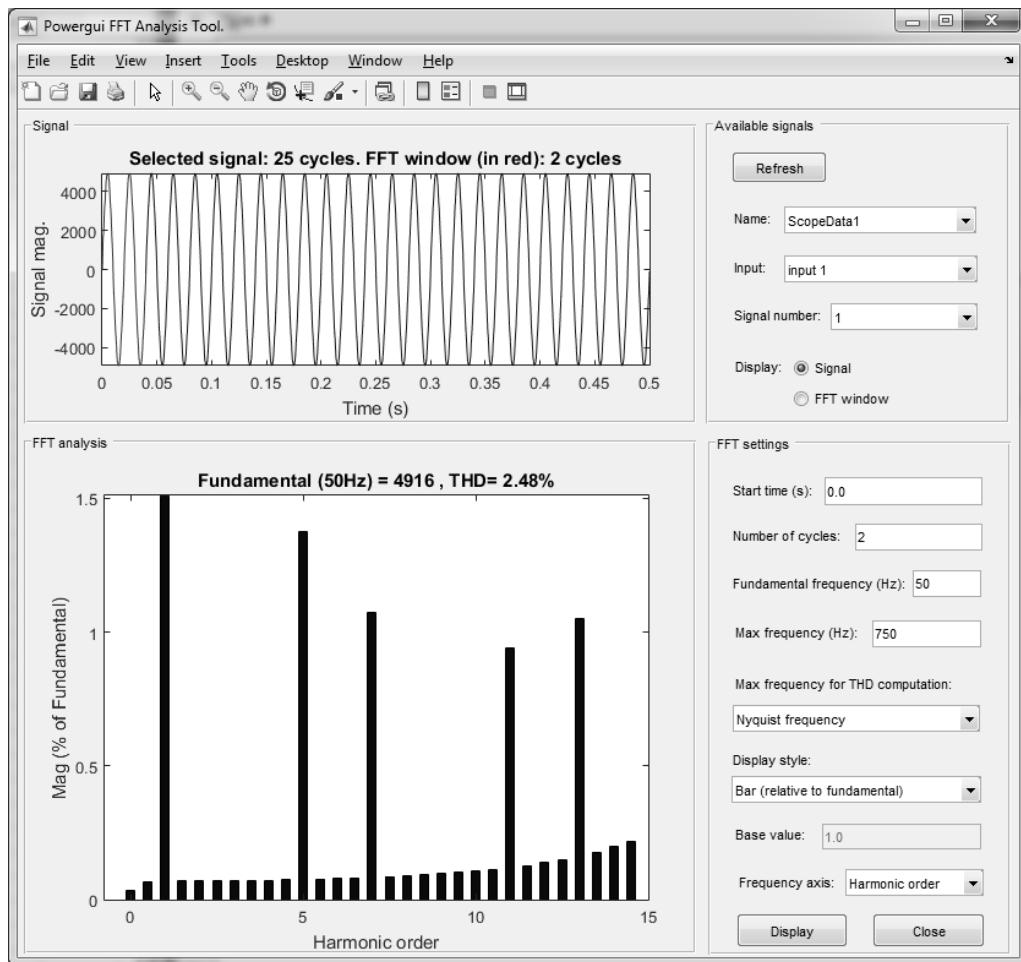


Рисунок 4.21 – Спектральный анализ напряжения при полном коэффициенте искажения THD=2,48%

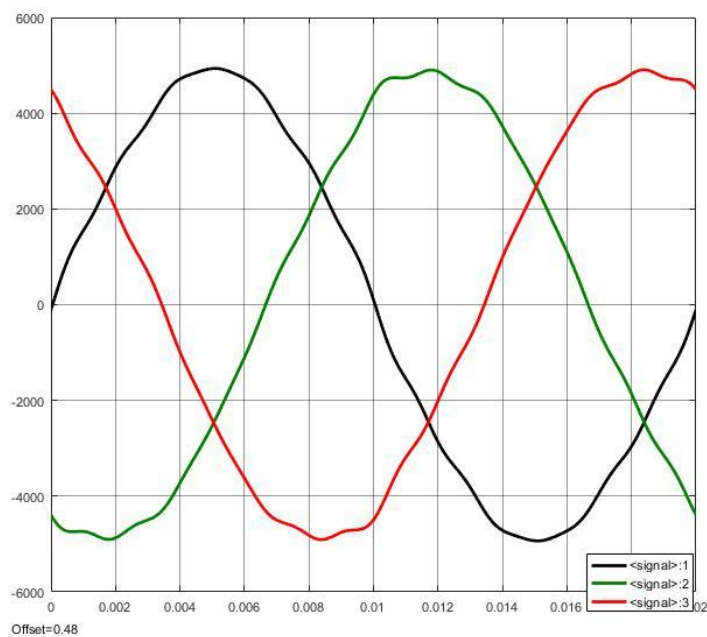


Рисунок 4.22 – Форма кривой напряжения при коэффициенте искажения THD=2,48%

Таблица 4.15 – Гармонический состав напряжения при различных амплитудах гармоник

Амплитуда гармоник $U_n / U_{ном}$	Коэффициент искажения, %	$n_1, \%$	$n_5, \%$	$n_7, \%$	$n_{11}, \%$	$n_{13}, \%$
0	0	100	0	0	0	0
0,5	1,3	100	0,7	0,54	0,47	0,52
1	2,3	100	1,37	1,07	0,94	1,05
2	4,6	100	2,75	2,15	1,91	2,14
3	6,8	100	4,12	3,22	2,84	3,18
4	9,1	100	5,5	4,3	3,79	4,24
5	11,37	100	6,88	5,37	4,74	5,3

Таблица 4.16 – Зависимость тока в фазах конденсаторной установки от коэффициента искажения

Коэффициент искажения, %	Ток $I_{КБ}, А$	Ток $I_{КБ} / I_{ном.КБ}$
0	43,3	1,00
1,3	43,67	1,01
2,3	44,34	1,02
4,6	46,92	1,08
6,8	50,93	1,18
9,1	56,06	1,29
11,37	62,03	1,43

Таблица 4.17 – Зависимость тока статора синхронного двигателя от коэффициента искажения

Коэффициент искажения, %	Ток статора $I_{ст}, А$	Ток статора $I_{ст} / I_{ном.ст.}$
0	70	1
1,06	70,7	1,01
1,8	71,12	1,016
3,4	71,19	1,017
5,1	71,26	1,018
6,8	71,4	1,02
8,5	71,61	1,023

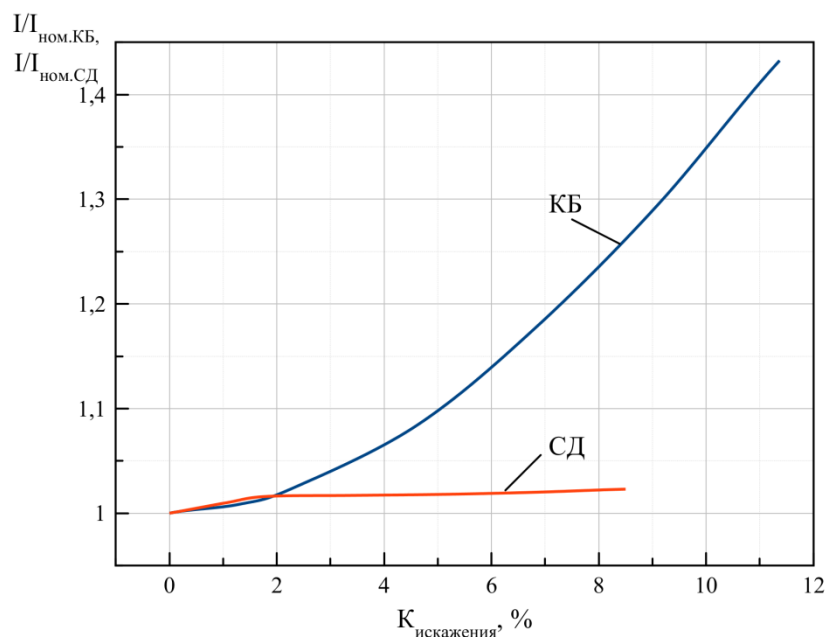


Рисунок 4.23 – Зависимость тока конденсаторной установки от коэффициента гармонических искажений напряжения

При допустимом уровне гармонических составляющих для электрических сетей 6-20 кВ ( $n_5=4\%$ ,  $n_7=3\%$ ,  $n_{11}=2\%$ ,  $n_{13}=2\%$ ) [21], т.е. при общем коэффициенте гармонических искажений (THD) равном 2,3%, перегрузка конденсаторной батареи составляет  $1,02I_{\text{ном}}$ , а ток статора синхронного двигателя  $1,016I_{\text{ном}}$ . В действительности, в системах электроснабжения, уровни гармонических составляющих могут значительно превышать допустимые значения. Конденсаторные установки допускают длительную работу при повышении действующего значения тока до  $1,3 I_{\text{ном}}$  (и  $1,1U_{\text{ном}}$ ), следовательно, предельным значением коэффициента искажения, при заданных условиях, будет  $\sim 9\%$ . При этом допустимая перегрузка синхронного двигателя по току статора составляет  $1,2I_{\text{ном}}$ , но как видно из рисунка 4.23, при увеличении амплитуды гармоник и коэффициента искажения, изменяется незначительно, в отличие от тока конденсаторной батареи. Из чего следует, что при значительной загрузки сети высшими гармониками, более предпочтительно использовать для компенсации реактивной мощности синхронные двигатели, т.к. батареи статических конденсаторов, в данной ситуации, будут работать со значительными перегрузками, что приводит к сокращению их срока службы и вероятностью выхода из строя конденсаторов.

## Результаты проведенного исследования

В результате произведенных технико-экономических расчетов и анализа режимов работы системы электроснабжения при использовании для компенсации реактивной мощности конденсаторных установок и синхронных двигателей получены следующие результаты:

1) На основе технико-экономического расчета, для рассматриваемой системы электроснабжения приемлемым вариантом является установка синхронных двигателей для привода компрессорных установок. Приведенные затраты для данного варианта составили 5000 у.е./год. Использование в данном случае асинхронных двигателей с конденсаторными батареями, как показал расчет, менее выгодно, так как годовые приведенные затраты для данного варианта составляют 5100 у.е./год. Для привода установок цеха №3 оптимальным оказался вариант использования асинхронных двигателей с конденсаторными батареями, чем при использовании синхронных двигателей сопоставимой мощности, разница в приведенных затратах составила 615,9 у.е./год.

2) Произведенный расчет оптимальной величины генерируемой синхронными двигателями компрессорных установок реактивной мощности показал, что компенсация реактивной мощности до нормативного значения может осуществляться данными синхронными двигателями. Приведенные затраты при этом будут на 433 у.е./год меньше, чем при использовании регулируемых конденсаторных установок сопоставимой мощности.

3) Рассчитанный экономический эффект при уменьшении годовых затрат на оплату реактивной энергии, при использовании синхронных двигателей, согласно расчету составил 19914,2 руб./год.

4) Оценка статической устойчивости, при утяжелении режима работы, показала, что использование синхронных двигателей обеспечивает большой запас устойчивости в нормальном и послеаварийном режимах. Так при варианте с использованием асинхронных двигателей в приводе компрессорных установок устойчивость нарушалась при напряжении 4647В в нормальном режиме и при 4931 В в послеаварийном. При использовании синхронных двигателей критическое напряжение узла нагрузки уменьшилось до 4103В в нормальном и 4620 В в послеаварийном режимах.

5) Оценка динамической устойчивости показала, что при наиболее тяжелом режиме синхронные двигатели способны сохранять устойчивую синхронную работу.

6) Анализ влияния несинусоидальности напряжения показал, что загрузка сети высшими гармониками, источниками которых являются электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой присутствующие в системе электроснабжения, будут оказывать отрицательное воздействие на конденсаторные установки и, следовательно, нарушать их нормальное функционирование.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5AM5E	Давыдов Денис Юрьевич

Институт	Энергетический	Кафедра	Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- стоимость оборудования
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- нормы амортизации и отчисления на текущий ремонт и эксплуатацию
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- норма дисконтирования

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	- общая экономическая концепция технологических решений
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	- обоснование капитальных затрат и выбора синхронных двигателей
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	- расчет экономической эффективности

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

- таблицы и графики по расчету чистого дисконтированного дохода и внутренней нормы доходности

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	к.э.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5E	Давыдов Денис Юрьевич		



## **Введение**

В данной работе рассматриваемся возможность использования синхронных двигателей установленных на предприятии для выработки реактивной мощности. Результатом реализации данных мероприятий, помимо технических преимуществ, является экономический эффект связанный со снижением стоимости оплаты потерь электроэнергии, связанных с передачей реактивной мощности по электрическим сетям. В данном разделе произведем сравнение технологических решений, рассматриваемых в основной части пояснительной записки, подсчет и обоснование капитальных затрат и расчет основных показателей экономической эффективности.

## 5.1 Общая экономическая концепция технологических решений

Рассмотрим два альтернативных варианта технологических решений:

1) В приводе компрессоров используются асинхронные двигатели, компенсация реактивной мощности осуществляется конденсаторными установками 6 кВ, компенсирующими потребляемую реактивную мощность данных двигателей. Данный вариант предусматривает компенсацию потребляемой асинхронными двигателями реактивной мощности конденсаторными батареями. Преимуществом данного варианта являются меньшие потери активной мощности на выработку реактивной по сравнению с синхронными двигателями (в зависимости от технических характеристик двигателя), т.е. в большинстве случаев возможно снижение эксплуатационных затрат. Стоимость асинхронных двигателей, как правило, ниже стоимости синхронных сопоставимой мощности. Недостатками этого варианта, в данном случае, являются: увеличение затрат, обусловленное необходимостью установки дополнительных ячеек комплектных распределительных устройств для присоединения конденсаторных установок, возможное снижение надежности и срока службы конденсаторных установок по причине загрузки сети высшими гармониками.

2) Для привода компрессорных установок используются синхронные двигатели, генерирующие реактивную мощность. Данный вариант предусматривает использование всей располагаемой реактивной мощности синхронных двигателей, установленных вместо асинхронных и отказ от использования конденсаторных установок. Несмотря на большие удельные потери активной мощности на выработку реактивной синхронными двигателями, данный вариант лишен недостатков первого варианта. Синхронные двигатели менее восприимчивы к несинусоидальности напряжения и позволяют плавно регулировать выдачу реактивной мощности, подстраиваясь под существующий график ее потребления.

Использование для регулирования реактивной мощности быстродействующих регуляторов возбуждения синхронных двигателей позволяет повысить устойчивость системы электроснабжения при аварийных режимах, что снизит вероятность отключения электроприемников и нарушения технологического процесса. Кроме того в данном варианте отсутствует необходимость установки дополнительных ячеек распределительных устройств, так как дополнительные конденсаторные батареи не устанавливаются.

Составим оценочную карту для сравнения данных технических решений (таблица 5.1). В столбцах Б и К указаны баллы и конкурентоспособность рассматриваемых вариантов. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Таблица 5.1 – Оценочная карта сравнения технических решений

Критерии оценки	Вес показателя	Вариант 1		Вариант 2	
		Б <sub>1</sub>	К <sub>1</sub>	Б <sub>1</sub>	К <sub>1</sub>
1. Цена	0,15	4	0,6	3	0,45
2. Надежность	0,15	3	0,45	4	0,6
3. Потери мощности	0,2	5	1	3	0,6
4. Быстродействие	0,05	4	0,2	4	0,2
5. Плавность регулирования	0,1	1	0,1	5	0,5
6. Устойчивость	0,15	3	0,45	4	0,6
7. Восприимчивость к высшим гармоникам	0,2	2	0,4	5	1
Итого		22	3,2	28	3,95

Как видно из результатов оценки, наиболее предпочтительным будет техническое решение соответствующее варианту 2 (использование СД), так как общая сумма баллов и конкурентоспособность данного решения больше.

## 5.2 Обоснование капитальных затрат и выбора синхронных двигателей

Произведем подсчет капитальных затрат на электрооборудование для двух вариантов:

1) Использование в приводе компрессорных установок асинхронных двигателей совместно с конденсаторными установками 6 кВ;

2) Использование в приводе компрессорных установок синхронных двигателей.

При расчете капитальных затрат, цены на оборудование принимаем по реальным отпускным ценам поставщиков.

Таблица 5.2 – Капитальные затраты на оборудование для варианта использования в компрессорных установках асинхронных электродвигателей

№ п/п	Наименование и тип электрооборудования	Кол-во, шт.	Цена единицы оборудования, руб.	Общие капитальные затраты, руб.
1	Асинхронный двигатель АТД2 АЗМ1-630/6000УХЛ4	2	1100000	2200000
2	Конденсаторная установка УК57-6,3-250-50	2	165800	331600
3	Ячейка КРУ 6 кВ	2	320250	640500
Итого				3172100

Таблица 5.3 – Капитальные затраты на оборудование для варианта использования в компрессорных установках синхронных электродвигателей

№ п/п	Наименование и тип электрооборудования	Кол-во, шт.	Цена единицы оборудования, руб.	Общие капитальные затраты, руб.
1	Синхронный двигатель STD-630-2	2	1138500	2277000
2	Тиристорный возбудитель с цифровым управлением ВТЕ-200-48Т-11Ц	2	157600	315200
Итого				2592200

Таблица 5.4 – Капитальные затраты на оборудование, не зависящие от вариантов выбора электроприводов компрессоров

№ П/П	Наименование и тип электрооборудования	Кол-во, шт.	Цена единицы оборудования, руб.	Общие капитальные затраты, руб.
1	Асинхронный двигатель А4-400У-8У3	6	699149	4194894
2	Конденсаторная установка УКЛ56-6,3-450	2	187600	375200
3	Конденсаторная установка УКЛ56-6,3-225	2	160400	320800
Итого				4890894

Из расчета видно, что капитальные затраты по первому варианту превышают капитальные затраты на вариант с использованием синхронных двигателей.

Определим приведенные затраты по вариантам с учетом актуальных данных по нормам амортизационных отчислений, отчислениям на ремонт и эксплуатацию [9], стоимости потерь электроэнергии на основе текущий тарифных ставок [15].

$$Z = K \cdot (E_n + E_{ам} + E_{тр}) + C_{ээ} \cdot \Delta W_{год},$$

где  $E_n, E_{ам}, E_{тр}$  - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, норма амортизационных отчислений и отчисления на текущий ремонт и эксплуатацию в процентах от общей суммы капитальных вложений;

$C_{ээ} = 0,108$  - стоимость 1 кВт·ч электроэнергии по действующему тарифу [15], руб./кВт·ч;

$\Delta W_{год}$  – годовые потери активной энергии, кВт·ч.

Годовые потери мощности для двух вариантов равны

$$\Delta W_{год} = 3545,04 \cdot 365 = 1293939,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Таблица 5.5 – Приведенные затраты на оборудование для варианта использования в компрессорных установках асинхронных электродвигателей

№ п/п	Наименование и тип электрооборудования	Капитальные вложения К, руб.	Норма амортизационных отчислений $E_{ам}$ , %	Отчисления на текущий ремонт и эксплуатацию $E_{тр}$ , %	Приведенные затраты, руб.
1	Асинхронный двигатель АД2 АЗМ1-630/6000УХЛ4	2200000	5,6	1,0	475200
2	Конденсаторная установка УК57-6,3-250-50	331600	10,0	0,8	55708,8
3	Ячейка КРУ 6 кВ	640500	10,0	1,0	108885
Суммарные приведенные затраты с учетом стоимости потерь энергии					779539,3

Таблица 5.6 – Приведенные затраты на оборудование для варианта использования в компрессорных установках синхронных электродвигателей

№ п/п	Наименование и тип электрооборудования	Капитальные вложения К, руб.	Норма амортизационных отчислений $E_{ам}$ , %	Отчисления на текущий ремонт и эксплуатацию $E_{тр}$ , %	Приведенные затраты, руб.
1	Синхронный двигатель STD-630-2	2277000	5,6	1,0	491832
2	Тиристорный возбудитель с цифровым управлением ВТЕ-200-48Т-11Ц	315200	7,1	1,0	72811,2
Суммарные приведенные затраты с учетом стоимости потерь энергии					704388,7

На основе полученных результатов пересчета годовых приведенных затрат, с учетом актуальных цен на оборудование и действующих тарифных ставок на электроэнергию, суммарные годовые приведенные затраты для варианта 2 (СД в приводе компрессорных установок) составили 704388,7 руб., что на 75150,6 руб. меньше чем при использовании асинхронных двигателей по варианту 1.

### 5.3 Расчет экономической эффективности

В данном разделе произведем расчет некоторых критериев оценки экономической эффективности от использования синхронных двигателей компрессорных установок для генерации реактивной мощности: чистый дисконтированный доход (ЧДД, NPV), внутреннюю норму доходности (ВНД, IRR), индекс доходности (ИД, PI) и срок окупаемости.

Расчет чистого дисконтированного дохода производим по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E_H)^t} - K,$$

где  $R_t$  – сумма денежных поступлений за  $t$ -ый год, руб.;

$Z_t$  - стоимостная оценка затрат за  $t$ -ый год, руб.;

$E_H = 11\%$  – норма дисконтирования;

$K$  – сумма капитальных затрат, руб.

За сумму капитальных затрат ( $K$ ) примем стоимость тиристорного возбудителя с цифровым управлением, необходимого для управления выработкой синхронным двигателем реактивной мощности. Сумма денежных поступлений ( $R_t$ ) будет равняться уменьшению годовых затрат на оплату реактивной энергии, а стоимостная оценка затрат ( $Z_t$ ) будет равна годовым затратам на покрытие дополнительных потерь активной мощности в синхронном двигателе (связанных с генерируемой реактивной мощностью), а также сумме затрат на амортизацию и обслуживание для системы регулирования возбуждения.

Величины прибыли от уменьшения годовых затрат на оплату РМ и годовые затраты на оплату дополнительных потерь были рассчитаны в пункте 3.6 и составляют

$$R = \Delta\Pi_{QCD} = 24925,2 \text{ руб./год}$$

$$З_{п}^{CD} = 5011 \text{ руб./год}$$

Таблица 5.7 – Данные по расчету ЧДД

t, год	Денежные поступления R, руб.	Затраты З, руб.	Чистый денежный поток, руб.
1	24925,2	5011	17940,72
2	49850,4	10022	32325,62
3	74775,6	15033	43683,27
4	99700,8	20044	52472,4
5	124626	25055	59090,54
6	149551,2	30066	63881,67
7	174476,4	35077	67142,89
8	199401,6	40088	69130,39
Итого	897307,2	180396	405667,5

На основе данных таблицы 5.7, определим чистый дисконтированный доход

$$\text{ЧДД} = 405667,5 - 315200 = 90467,5 \text{ руб.}$$

Рассчитаем индекс доходности по формуле

$$\text{ИД} = \frac{\text{ЧДД}}{K} = \frac{405667,5}{315200} = 1,287$$

Срок окупаемости представляет собой минимальный временной промежуток, начиная с которого первоначальные вложения покрываются суммарными дисконтированными доходами. Исходя из данных таблицы, срок окупаемости будет равен  $T_{ок} = 6$  лет, так как

$$\sum_{t=1}^6 \frac{R_t - З_t}{(1 + E_H)^t} = 336537,1 > 315200 \text{ руб.}$$



Внутренняя норма доходности ( $E_{ВН}$ ) определяется, исходя из следующего условия

$$\sum_{t=1}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E_{ВН})^t} - K = 0$$

Таблица 5.8 – Данные по расчету внутренней нормы доходности

t, год	Денежные поступления R, руб.	Затраты Z, руб.	Чистый денежный поток, руб.
1	24925,2	5011	17080,54
2	49850,4	10022	29300,18
3	74775,6	15033	37696,43
4	99700,8	20044	43109,96
5	124626	25055	46219,62
6	149551,2	30066	47571,44
7	174476,4	35077	47602,72
8	199401,6	40088	46661,9
Итого	897307,2	180396	315242,79

Методом подстановки определено значение внутренней нормы доходности, которое равно

$$E_{ВН} \approx 0,1659$$

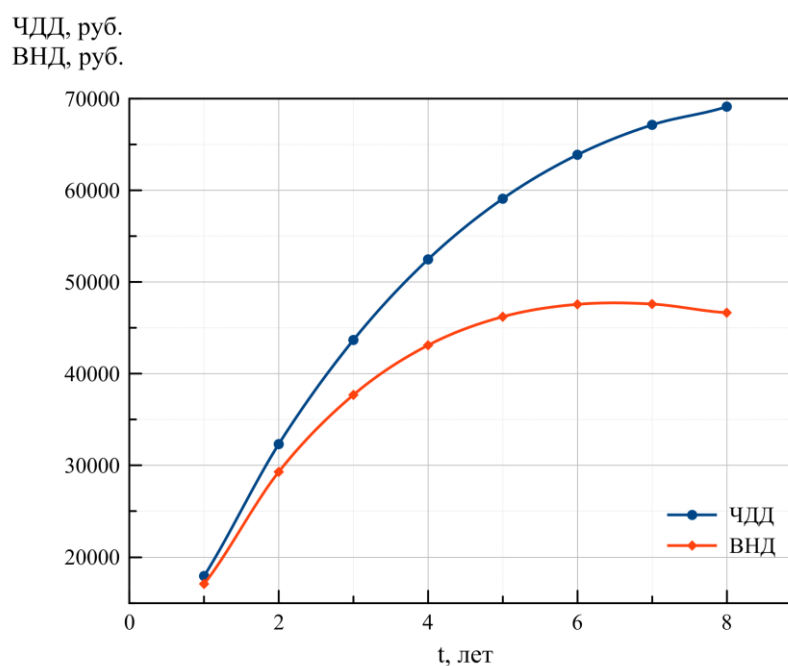


Рисунок 5.1 – График изменения ЧДД и ВВД по годам