

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

На правах рукописи

Кочетков Владимир Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ  
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С  
СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

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

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Котенев В.И.

Самара 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН .....	13
1.1 Краткий обзор по математическому описанию синхронных машин как объектов управления их параметрами .....	13
1.2 Алгоритмы управления возбуждением синхронных машин .....	17
1.3 Постановка проблемы исследования .....	22
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБОБЩЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЕЕ РЕЖИМА .....	23
2.1 Динамические характеристики синхронной машины .....	25
2.1.1 Общие замечания .....	25
2.1.2 Уравнения электромагнитных процессов синхронной машины.....	26
2.1.3 Математическая модель электромеханических процессов синхронной машины.....	28
2.1.4 Обобщенная модель синхронной машины при управлении ее возбуждением .....	30
2.1.5 Определение параметров синхронного двигателя.....	34
2.1.6 Переходные характеристики синхронного двигателя с выходной переменной углом нагрузки.....	40
2.1.7 Математическая модель синхронного двигателя с регулируемой переменной – реактивной мощностью.....	44
2.2 Математическая модель обобщенной СЭС с учетом неустойчивости напряжения в сети .....	48
2.3 Методика определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным.....	52
2.4 Методика расчета активной и реактивной мощности при разгоне асинхронного двигателя .....	61
2.5 Переходные характеристики коэффициента РМ и напряжения в узле нагрузки.....	65
2.6 Динамические характеристики СЭС с учетом влияния обратной связи по напряжению .....	68
2.7 Методика вычисления приращений реактивной мощности и угла нагрузки синхронного двигателя при колебании напряжения в сети. Погрешность методики.....	72

2.8 Погрешность системы управления коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом без обратных связей .....	74
2.9 Выводы по второй главе .....	75
<b>3 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ СИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ.....</b>	<b>77</b>
3.1 Синхронный электропривод с обратной связью по току возбуждения .....	77
3.2 Синхронный электропривод с обратной связью по внутреннему углу двигателя .....	86
3.3 Синхронный электропривод с обратными связями по току возбуждения и внутреннему углу двигателя .....	91
3.4 Синхронный электропривод с обратной связью по реактивной мощности синхронного двигателя .....	100
3.5 Синхронный электропривод с обратными связями по току возбуждения и реактивной мощности двигателя .....	106
3.6 Раскрытие противоречия между основными показателями качества процессов регулирования .....	113
3.7 Экономическое обоснование САУ коэффициентом реактивной мощности СЭС с программным управлением .....	114
3.8 САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом с отрицательными обратными связями по току возбуждения и реактивной мощности СД и с компенсирующей связью по мощности асинхронной нагрузки.....	116
3.8 Выводы по третьей главе.....	120
<b>4 РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ .....</b>	<b>122</b>
4.1 Внедрение в практику элементов системы управления коэффициентом реактивной мощности .....	122
4.2 Устройство экспериментальной установки системы управления коэффициентом реактивной мощности .....	124
4.3 Исследование системы управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения с внутренней обратной связью по реактивной мощности и компенсирующей связью по мощности асинхронного двигателя на экспериментальной установке .....	127
4.4 Выводы по четвертой главе.....	134

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	136
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	139
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	151
Приложение 1 .....	152
Приложение 2 .....	153
Приложение 3 .....	154

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы**

Основной задачей энергоснабжающих организаций является своевременное обеспечение промышленного оборудования потребителей электрической энергией требуемого качества и в необходимых объемах при минимальных потерях активной мощности при ее транспортировке. В действительности потери в элементах энергосистемы при транспортировке значительны, потому что практически для всех энергосистем ЕЭС России характерна работа питающих и распределительных сетей с невысоким коэффициентом мощности. Снижение этих потерь невозможно без компенсации реактивной мощности (РМ) на стороне энергопринимающих устройств.

Для стимулирования проведения соответствующих мероприятий по регулированию реактивной мощности установлена система надбавок и скидок к тарифу за потребленную электрическую энергию посредством начисления повышающих или понижающих тарифных коэффициентов, величину которых можно изменять за счет управления коэффициентом РМ в точке подключения системы электроснабжения (СЭС) к электрической системе и получить значительный экономический эффект.

При наличии в СЭС асинхронных и синхронных электроприводов это возможно осуществить за счет регулирования возбуждения синхронных электродвигателей.

Поэтому разработка систем автоматического управления, с помощью которых удастся понизить величину тарифных коэффициентов до рационального уровня, относится к актуальным проблемам.

### **Степень разработанности проблемы**

Математическим моделям и алгоритмам управления возбуждением синхронных генераторов посвящено достаточно много работ. Среди них значительное место занимает работы отечественных ученых: Веникова В.А., Герценберга Г.Р., Глебова И.А., Горева А.А., Груздева И.А., Жданова П.С., Каштеляна В.Е., Костенко М.П., Матюхина В.М., Михневича Г.В., Юрганова А.А. и др. и работы за-

рубежных авторов: Adkins B., Anderson P.M., Harris M.R., Lawerson P.J., Kimbark E.W., Park R.A., Concordia C., Steverson W.D., Taylor G.D. и др.

Математическому моделированию, алгоритмизации, системам управления возбуждением синхронных двигателей посвящено значительно меньше работ, хотя у моделей синхронных двигателей и генераторов много общего. Основные из них принадлежат следующим авторам: Абакумову А.М., Дубинину Д.Ф., Кириллину И.В., Матюхину В.М., Михневичу Г.В., Петелину Д.П., Рассказову Ф.Н., Сиунову А.С. и др.

Вышеперечисленные проблемы в этих работах рассмотрены без учета колебания напряжения в сети и без учета влияния параметров асинхронной и конденсаторной нагрузок. Причем проблема управления коэффициентом РМ СЭС за счет изменения возбуждения синхронных двигателей при разгоне асинхронных двигателей с учетом неустойчивости напряжения в сети в литературе рассмотрена еще недостаточно. Все это позволило сформулировать цель работы и поставить задачи научных исследований.

**Целью работы** является повышение эффективности управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработать уточненную математическую модель синхронного двигателя при его работе в электрической сети с нестабильным напряжением.

2. Разработать математическую модель объекта управления – системы электроснабжения, состоящей из линии электропередачи, силовых трансформаторов, статических компенсирующих устройств, синхронных и асинхронных двигателей и ориентированную на решение задач управления коэффициентом РМ СЭС.

3. Разработать методику расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным для определения активной и реактивной мощности при его пуске и методику вычисления прира-

щений реактивной мощности синхронного двигателя при вариациях напряжения в электрической сети.

4. Разработать систему управления возбуждением синхронного двигателя, позволяющую обеспечить заданные значения погрешности стабилизации коэффициента РМ СЭС.

5. Создать экспериментальную установку и провести исследование алгоритмов управления возбуждением синхронного электродвигателя.

**Объектом исследования** является система электроснабжения с синхронным электроприводом.

**Предметом исследования** являются алгоритмы управления и структуры систем автоматического управления (САУ) коэффициентом РМ СЭС и экономическая эффективность их использования.

#### **Методы решения**

В работе использованы методы теории электрических систем, электрических машин, электрического привода, теории автоматического управления и методы математического моделирования на ПК в среде MATLAB Simulink.

#### **Научная новизна**

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Математическая модель обобщенной СЭС как объекта управления, отличающаяся учетом асинхронной и конденсаторной нагрузок, активных сопротивлений линии электропередачи и трансформаторов, а также учетом нестабильности напряжения в электрической сети.

2. Методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным, отличающаяся от известных меньшей погрешностью, а также методики расчетов активной и реактивной мощности при разгоне асинхронного двигателя и вычисления приращений реактивной мощности для различных режимов синхронного двигателя при изменении напряжения в электрической сети.

3. Структурно-параметрический синтез и динамические характеристики САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом, отличающиеся учетом

требований к точностным характеристикам системы в условиях разгона асинхронных двигателей.

**Практическая значимость работы** состоит в следующем:

1. Создана методика расчета и разработана система управления синхронным электроприводом с обратной связью по реактивной мощности синхронного двигателя и компенсирующей связью по активной и реактивной мощности асинхронных двигателей, что позволило уменьшить погрешность регулирования коэффициента РМ СЭС и тем самым понизить величину тарифного коэффициента на электроэнергию на 2,9%.

2. Разработаны вычислительные модели объекта управления и системы управления синхронным электроприводом с различными связями по переменным объекта управления.

3. Результаты работы внедрены в практику инженерного обслуживания электрооборудования кустовой насосной станции «Бариновская» (Акт внедрения АО «Самаранефтегаз»).

**Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается использованием проверенных математических методов, научным обоснованием принятых допущений, использованием сертифицированного программного продукта при проведении вычислительных экспериментов на ПК в среде MATLAB Simulink, а также использованием сертифицированных измерительных приборов при проведении экспериментальных исследований и подтверждается согласованностью расчетных данных с результатами экспериментальных исследований. Результаты работы использованы в практике инженерного обслуживания КНС «Бариновская» АО «Самаранефтегаз» и рекомендованы к внедрению АО «Самарская сетевая компания», а также использованы в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях:

- 1) II Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в энергетике» (г. Пенза, 2014).
- 2) VI международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2015).
- 3) X Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (Казань, 2015).
- 4) VII международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2016).
- 5) XX аспирантско–магистерский семинар, посвященный «Дню энергетика» (Казань, 2016).
- 6) International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Astana, Kazakhstan, 2017).
- 7) XI International scientific and technical conference "Applied Mechanics and Dynamics Systems" 14–16 November 2017, Omsk, Russian Federation.

А также на научных семинарах кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ общим объемом 6,34 п.л., в том числе 2 статьи в библиографических и реферативных базах данных Scopus и Web of Science, 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня ВАК РФ.

### **На защиту выносятся:**

1. Математическая модель системы электроснабжения как объекта управления коэффициентом РМ за счет управления напряжением возбуждения синхронного двигателя.
2. Математическая модель синхронного двигателя как объекта управления по цепи возбуждения с учетом неустойчивости напряжения в сети.

3. Методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным и методика расчета активной и реактивной мощности при его разгоне.

4. Структуры системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения с синхронным электроприводом со связями по различным координатам объекта управления.

**Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук** выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует пунктам:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

3. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Основная часть диссертация изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 107 рисунков, 12 таблиц и 3 приложения. Библиографический список состоит из 130 наименований на 12 страницах.

### **Содержание работы**

**Во введении** дано обоснование актуальности работы, посвященной совершенствованию САУ коэффициентом РМ СЭС с асинхронными и синхронными электродвигателями. Сформулирована цель работы и задачи исследования, а также изложена научная новизна и значимость полученных результатов на практике.

**В первой главе** проведен анализ публикаций по математическому описанию синхронных машин с регулируемым возбуждением как объектов управления их переменными и рассмотрены принципы построения систем управления возбуждением этих машин. На основании обзора конкретизирована проблема научных исследований диссертационной работы.

**Во второй главе** приведены уравнения электромагнитных и электромеханических процессов синхронной машины на основе которых разработана ее математическая модель как объекта управления током обмотки возбуждения, внутренним углом и реактивной мощностью при работе машины в режиме двигателя с постоянной нагрузкой. В отличие от существующих моделей, она учитывает непостоянство напряжения в электрической сети. При неизменном напряжении в сети предложенная модель совпадает с существующими альтернативными моделями. Разработана методика определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным и методика расчета активной и реактивной мощности при его разгоне. Рассмотрена методика расчета внутреннего угла и реактивной мощности синхронного двигателя при изменении напряжения в сети. На основе математической модели синхронного двигателя с учетом уравнений асинхронных двигателей, статических компенсирующих устройств, линии питания построена математическая модель системы электроснабжения как объекта управления с выходными переменными – реактивной мощностью и отклонением напряжения в узле нагрузки. Методом компьютерного моделирования показана необходимость учета колебания напряжения в сети и влияния параметров элементов СЭС на регулируемые параметры ее режима.

**В третьей главе** рассматриваются САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом, имеющим связи по различным переменным объекта управления и ее динамические характеристики.

Рассмотрен синтез регуляторов одноконтурных систем управления током возбуждения, углом нагрузки, реактивной мощностью и двухконтурных систем управления углом нагрузки и реактивной мощностью синхронного двигателя для двух вариантов синхронного электропривода.

Разработана САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом (ЭП) с обратной связью по РМ СД и компенсирующей связью по мощности асинхронной нагрузки.

Дано экономическое обоснование применению САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом.

**В четвертой главе** посвящена реализации и исследованию синхронного электропривода системы управления коэффициентом РМ на экспериментальной установке с синхронным двигателем номинальной мощностью  $P_n = 5$  кВт. Дана оценка отклонения расчетных данных от экспериментальных.

# 1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН

## 1.1 Краткий обзор по математическому описанию синхронных машин как объектов управления их параметрами

В работах [10, 69] было предложено несколько вариантов структурных схем синхронных генераторов электрических станций, которые характеризуются в первую очередь наличием в них сложных динамических звеньев. Эти структурные схемы можно использовать лишь для наглядного представления действия взаимных связей между величинами, входящими в эти схемы и крайне затруднительно использовать их для структурного анализа и синтеза.

В [74] предложены более простые динамические характеристики синхронных машин в виде структурных схем с учетом переходных процессов в статорной цепи (рисунок 1.1) и без их учета (рисунок 1.2), но и их использование для построения систем управления возбуждением синхронных двигателей также проблематично из-за затруднения в определении зависимости

$$N = -T_{q0}U_2 \frac{x_d - x'_d}{z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}),$$

где  $x_d$ ,  $x'_d$  – индуктивное сопротивление и переходное сопротивление машины по продольной оси;  $z_{12}$  – модуль взаимного полного сопротивления;  $\alpha_{12}$  – дополнительный угол взаимного полного сопротивления;  $\delta_{12}$  – внутренний угол машины;  $U$  – напряжение на шинах станции.

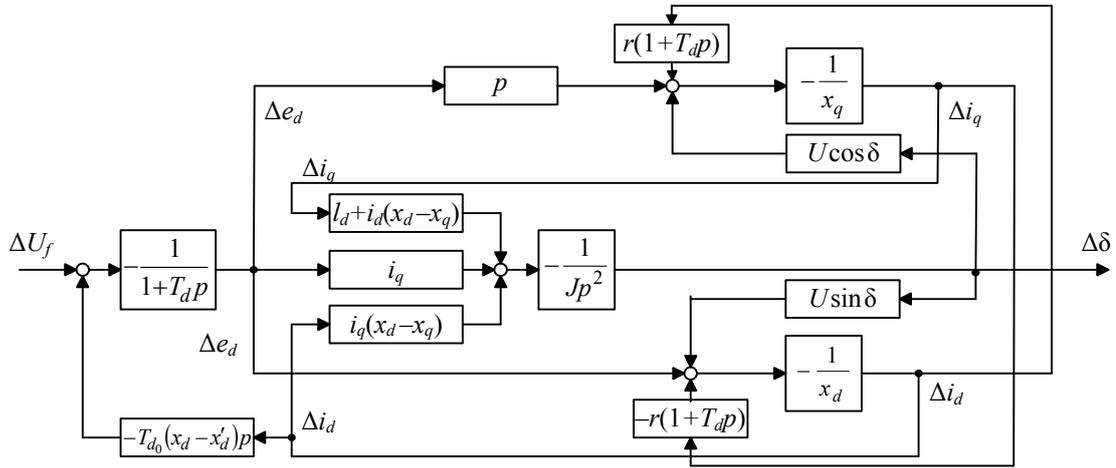


Рисунок 1.1 – Структурная схема управления возбуждением синхронной машины с учетом переходных процессов в статорной цепи

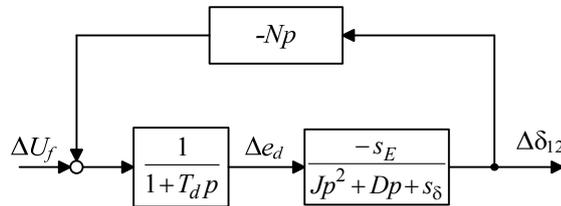


Рисунок 1.2 – Обобщенная структурная схема управления возбуждением синхронных машин без учета переходных процессов в статорной цепи

Наиболее близкими по существу являются структурные схемы синхронного двигателя (без учета переходных процессов в статорной цепи) [77] при регулировании возбуждения в функции внутреннего угла  $\theta$  (рисунок 1.3) и в функции его реактивной мощности  $Q$  (рисунок 1.4).

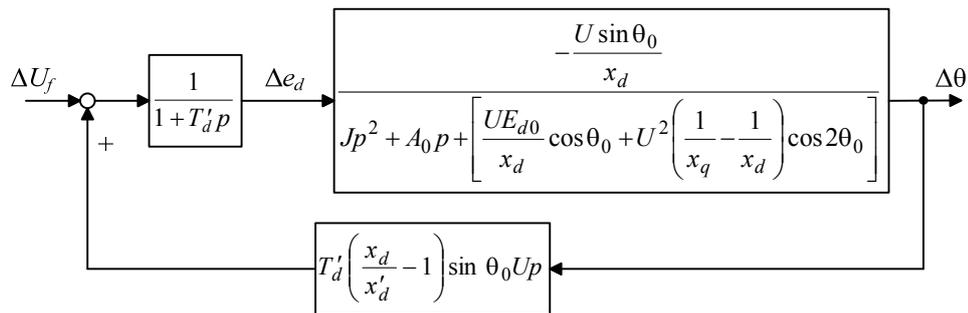


Рисунок 1.3 – Обобщенная структурная схема синхронного двигателя с регулированием возбуждения в функции внутреннего угла

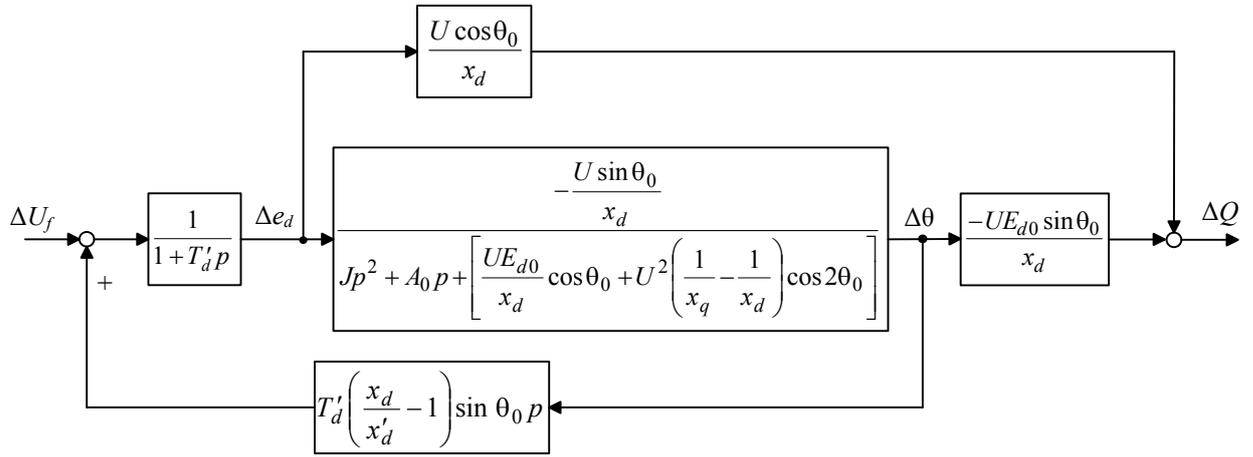


Рисунок 1.4 – Структурная схема синхронного двигателя при регулировании возбуждения в функции реактивной мощности

В вышеперечисленных моделях, как и в модели [99] (рисунок 1.5) не учитываются колебания напряжения в сети и влияние других элементов узла нагрузки (асинхронных двигателей и конденсаторных батарей).

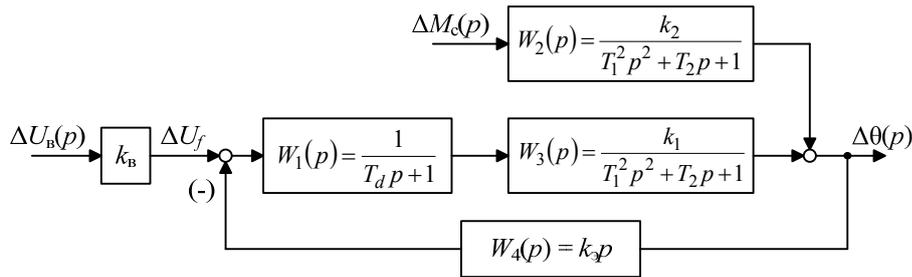


Рисунок 1.5 – Структурная схема регулирования угла нагрузки синхронного двигателя

На схеме (рисунок 1.5) использованы следующие обозначения:

$$k_B = \frac{E_{d0}}{U_{BH}}; k_1 = \frac{\text{tg } \theta_0}{E_{d0}}; k_2 = -\frac{1}{M_{\max} \cos \theta_0}; k_3 = T'_d \left( \frac{x_d}{x'_d} - 1 \right) U_c \sin \theta_0.$$

Усеченная модель (рисунок 1.6), используемая в работах [22, 99] не учитывает влияние ЭДС  $E_d$  на реактивную мощность  $Q$  синхронного двигателя и напряжение  $U$  в узле нагрузки.

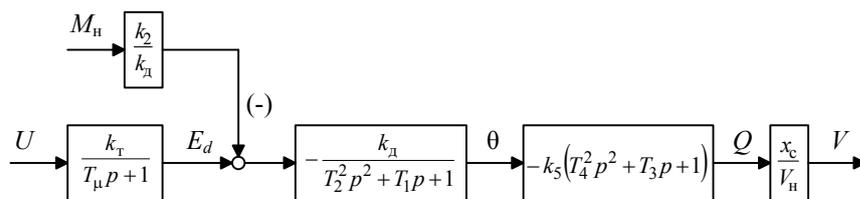


Рисунок 1.6 – Структурная схема синхронного двигателя

В [104] используется модель синхронной машины (рисунок 1.7), которая используется для исследования внешнего движения электростанции.

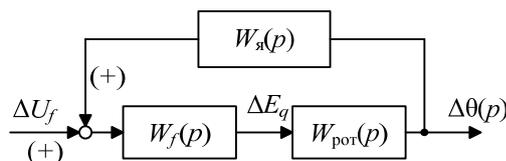


Рисунок 1.7 – Структурная схема синхронной машины, работающей в энергосистеме

В схеме (рисунок 1.7) звено с передаточной функцией

$$W_f(p) = \frac{1}{T'_d p + 1}$$

отражает контур возбуждения машины, а форсирующее звено с передаточной функцией

$$W_я(p) = \frac{x_d - x'_d}{x_d - x_{вн}} T_{d0} U_c \sin \theta_0 p$$

– реакцию якоря.

Колебательное звено с передаточной функцией

$$W_{рот}(p) = - \frac{U_c \sin \theta_0}{H_f x_{d\Sigma} p^2 + D x_{d\Sigma} p + E_{q0} U_c \cos \theta_0 + U_c^2 \cos 2\theta_0 (x_d - x_q) / x_{q\Sigma}}$$

отражает движение ротора гидрогенератора.

Передаточная функция ротора турбогенератора упрощается так как  $x_d = x_q$ , тогда

$$W_{рот}(p) = - \frac{U_c \sin \theta_0}{H_f x_{d\Sigma} p^2 + D x_{d\Sigma} p + E_{q0} U_c \cos \theta_0},$$

где  $H_f = T_f / \omega_0$ ,  $D$  – коэффициенты, учитывающие действие демпферных моментов.

Данная динамическая модель (рисунок 1.7) применительно к модели узла нагрузки также не учитывает влияние его других элементов (асинхронных двигателей и конденсаторных батарей) и не учитывает влияние неустойчивости напряжения сети.

## 1.2 Алгоритмы управления возбуждением синхронных машин

Проблеме разработки алгоритмов управления синхронных машин большой мощности посвящено достаточно много работ [1, 2, 10-15, 18-23, 25-32, 38-40, 43-46, 69, 74, 77, 78, 84, 86, 89-91, 95-104, 111-113, 115-118, 121-127]. Из них можно выделить работы [69, 74, 77, 99], в которых показано, что эти алгоритмы заложены в регуляторах соответствующих систем автоматического управления возбуждением синхронных машин.

Алгоритм управления в системе (рисунок 1.8) [74] формируется в функции нескольких параметров: внутреннего угла  $\Delta\delta_{12}$ ; ЭДС  $\Delta e_d$ ; токов  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  и их производных, что на практике неудобно из-за большого числа регулируемых параметров.

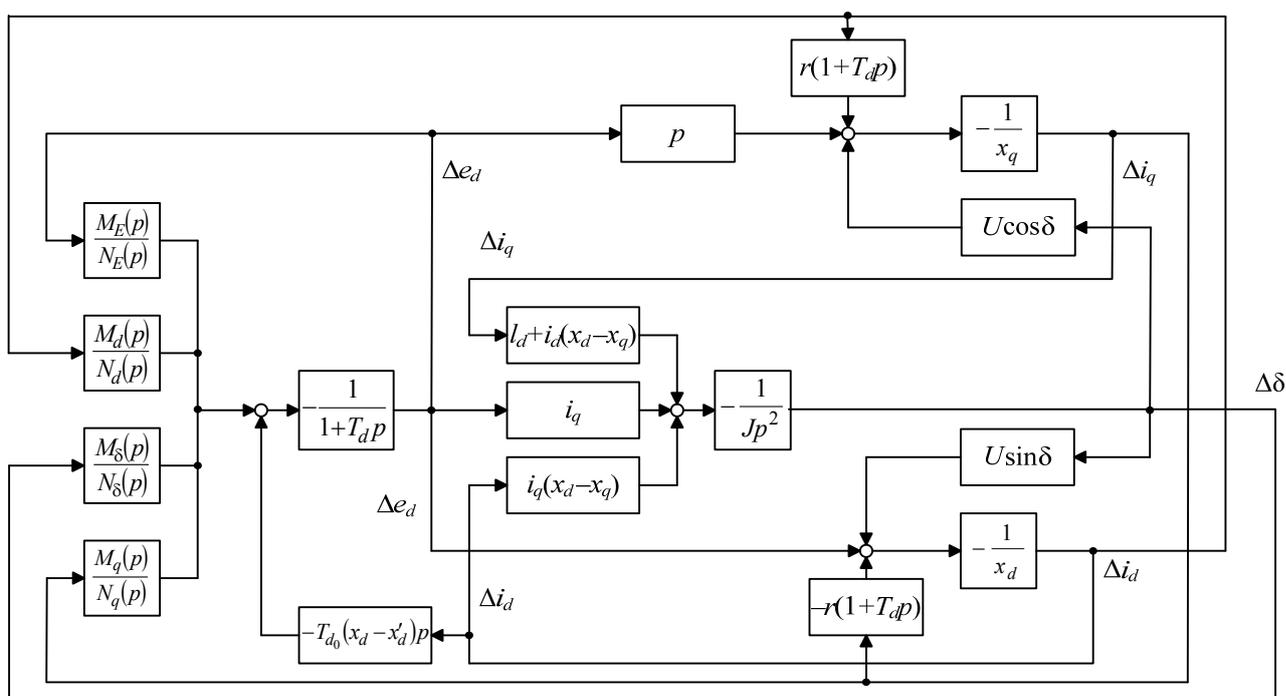


Рисунок 1.8 – Структурная схема системы автоматического регулирования возбуждения синхронной машины с учетом переходных процессов в статорной цепи

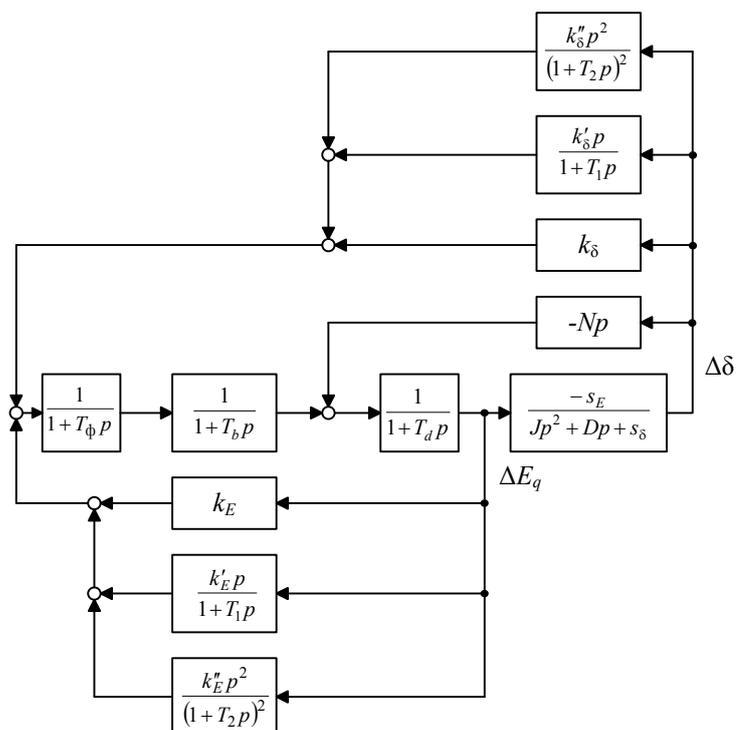


Рисунок 1.9 – Обобщенная структурная схема системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин без учета переходных процессов в статорной цепи

Более совершенен алгоритм управления (рисунок 1.9), формируемый в функции двух величин  $\Delta e_d$  и  $\Delta \delta_{12}$  и их производных.

На схеме (рисунок 1.9) использованы следующие обозначения:

$$N = -T_{q0} U_2 \frac{x_d - x'_d}{z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12});$$

$$T'_d = T_{d0} \left( 1 - \frac{x_d - x'_d}{z_{11}} \cos \alpha_{11} \right);$$

$z_{11}$ ,  $z_{12}$  – модули собственного и взаимного полного сопротивления;  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{12}$  – дополнительные углы этих сопротивлений.

В данном случае система управления рассматривается как многоконтурная, в которой осуществляется регулирование только двух величин.

В результате электродинамического моделирования показано [21, 69], что наиболее эффективной системой управления возбуждением синхронной машины является система управления с обратной связью по основной регулируемой величине – напряжению машины  $U_r$  и связью по углу  $\theta$  и его производным. Однако, при этом требуется телепередача фазы напряжения приемной электростанции  $U_c$ .

С целью упрощения системы управления целесообразно [104] использование обратной связи по частоте напряжения генератора и ее первой производной вместо связи соответственно по первой и второй производным угла  $\theta$ . Регулирование возбуждения, в этом случае, ведется по напряжению и частоте на выводах генератора и следовательно не требуется дополнительных измерительных трансформаторов на стороне высокого напряжения электростанции. В результате этого существенно упрощается система управления возбуждением машины.

Выражения связывающие переменные  $\Delta E_q(p)$  и  $\Delta\theta(p)$  с частотой и напряжением машины или узла нагрузки получены из упрощенных уравнений электромагнитных процессов неявнополюсной машины:

$$X_q I_q = U_\Gamma \sin \theta_\Gamma;$$

$$X_d I_d = E_q - U_\Gamma \cos \theta_\Gamma;$$

$$X_{q\Sigma} I_q = U_c \sin \theta;$$

$$X_{d\Sigma} I_d = E_q - U_c \cos \theta;$$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_{\text{вн}}; X_{q\Sigma} = X_q + X_{\text{вн}},$$

где  $U_\Gamma$ ,  $U_c$  – напряжения генератора и системы;  $\theta_\Gamma$  – угол между векторами  $E_q$  и  $U_\Gamma$ ;  $X_{\text{вн}}$  – индуктивное сопротивление внешней цепи, в которую могут входить трансформаторы и линия электропередачи.

В результате решения этой системы уравнения в приращениях получено:

$$\Delta U_\Gamma(p) = k_3 \Delta I_f(p) + k_4 \Delta\theta(p); \quad \Delta f(p) = k_5 \Delta I_f(p) + k_6 \Delta\theta(p),$$

где

$$k_3 = c_3 X_{ad} \cos \theta_{\Gamma 0}; \quad k_4 = -c_3 E_{q0} \sin \theta_{\Gamma 0}; \quad k_5 = \frac{2\pi c_3 X_{ad}}{U_{\Gamma 0}} \sin \theta_{\Gamma 0};$$

$$k_6 = \frac{2\pi c_3 E_{q0}}{U_{\Gamma 0}} \cos \theta_{\Gamma 0}; \quad c_3 = \frac{X_{\text{вн}}}{X_{ad} + X_{\text{вн}}};$$

$\Delta U_\Gamma(p)$ ,  $\Delta f(p)$  – изображения приращений напряжения и частоты генератора;  $X_{\text{вн}}$  – сопротивление внешних элементов, расположенных между генератором и электрической системой.

Структурная схема системы автоматического управления напряжением генератора представлена на рисунке 1.10.

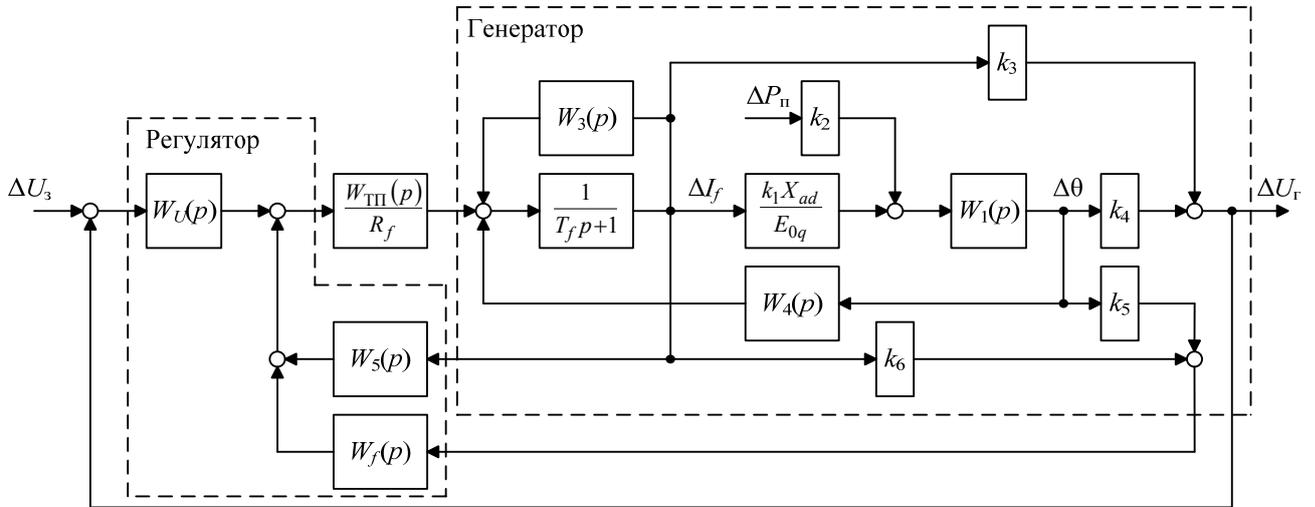


Рисунок 1.10 – Структурная схема системы автоматического управления напряжением генератора

Она состоит из моделей генератора, тиристорного преобразователя и регулятора. Регулятор представлен передаточными функциями  $W_U(p)$ ,  $W_5(p)$ ,  $W_f(p)$ , а тиристорный преобразователь –  $W_{ТП}(p)$ . Датчики тока возбуждения, частоты и напряжения генератора входят в состав передаточных функций регулятора своими коэффициентами передачи.

В системах управления возбуждением синхронных двигателей [77] используются алгоритмы (рисунки 1.11, 1.12), сформированные в функции ЭДС, угла нагрузки и их производных.

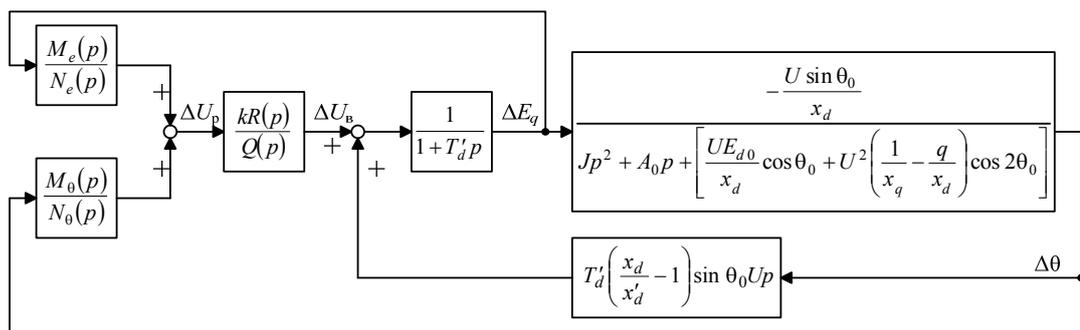


Рисунок 1.11 – Обобщенная структурная схема синхронного двигателя с регулированием возбуждения в функции угла нагрузки

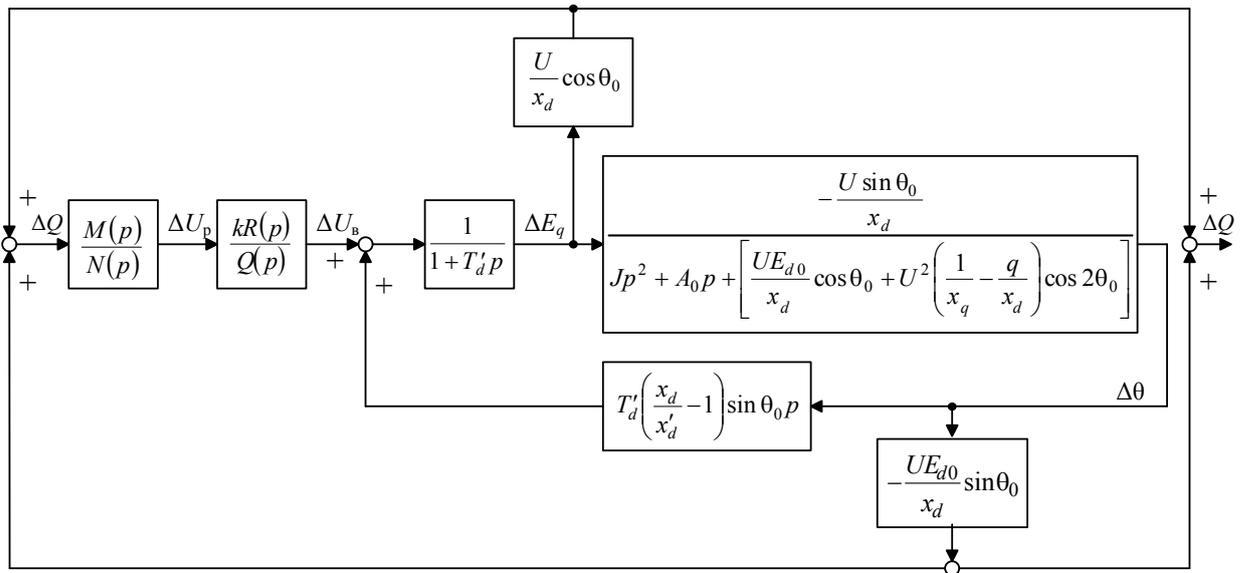


Рисунок 1.12 – Обобщенная структурная схема синхронного двигателя при регулировании возбуждения в функции реактивной мощности

Кроме этих алгоритмов могут быть использованы алгоритмы управления [12, 77], с помощью которых обеспечивается стабилизация одной из следующих переменных: напряжения двигателя или узла нагрузки; тока возбуждения; внутреннего угла двигателя; активного или реактивного тока статора; реактивной мощности синхронного двигателя или узла нагрузки; коэффициента реактивной мощности синхронного двигателя или узла нагрузки.

В рассматриваемых системах управления возбуждением машин с вышеперечисленными алгоритмами не учитывается колебание напряжения сети, а построение систем управления параметрами двигателя или узла нагрузки производится без учета характеристик его элементов (асинхронных двигателей и конденсаторных установок).

В работах [22, 99] рассматриваются задачи синтеза оптимальных систем управления возбуждением двигателя при случайных изменениях нагрузки, которые, как утверждают эти авторы, позволяют получить более качественное управление. К сожалению, в этих работах нет сравнительного анализа предложенных ими систем управления с существующими. Причем передаточные функции оптимальных регуляторов [99]

$$W_{pez} = \frac{\sum_{i=0}^4 a_i p_i}{\sum_{j=0}^4 b_j p_j}$$

имеют достаточно высокий порядок и на практике сложны в обслуживании.

Тем более, как утверждает О.В. Слежановский [85] «оптимальной в практическом отношении следует считать ту систему управления, при помощи которой достигается приближение к тому или иному оптимальному графику движения наиболее простыми средствами».

### 1.3 Постановка проблемы исследования

Проведенный краткий обзор по математическому моделированию и алгоритмам управления возбуждением синхронных машин позволяет конкретизировать проблему исследований в следующей постановке:

1. Разработать математическую модель системы электроснабжения, включающей в свой состав линию питания, асинхронные и синхронные двигатели, конденсаторную установку и учитывающую колебание напряжения в сети, а также ориентированную на решение задач управления коэффициентом РМ СЭС.
2. Разработать методику расчета отклонений угла нагрузки и реактивной мощности синхронного двигателя при его работе в системе электроснабжения с нестабильным напряжением в сети.
3. Разработать методику расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным, позволяющую найти временную зависимость активной и реактивной мощности при пуске двигателя.
4. Произвести структурно-параметрический синтез САУ коэффициентом реактивной мощности СЭС с синхронным электроприводом.
5. Провести моделирование и экспериментальное исследование САУ коэффициентом реактивной мощности СЭС с различными связями по переменным синхронного двигателя.

## 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБОБЩЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЕЕ РЕЖИМА

Обобщенная схема системы электроснабжения промышленных предприятий [94] представлена на рисунке 2.1, а вариант схемы системы электроснабжения нефтяных промыслов [71] – на рисунке 2.2.

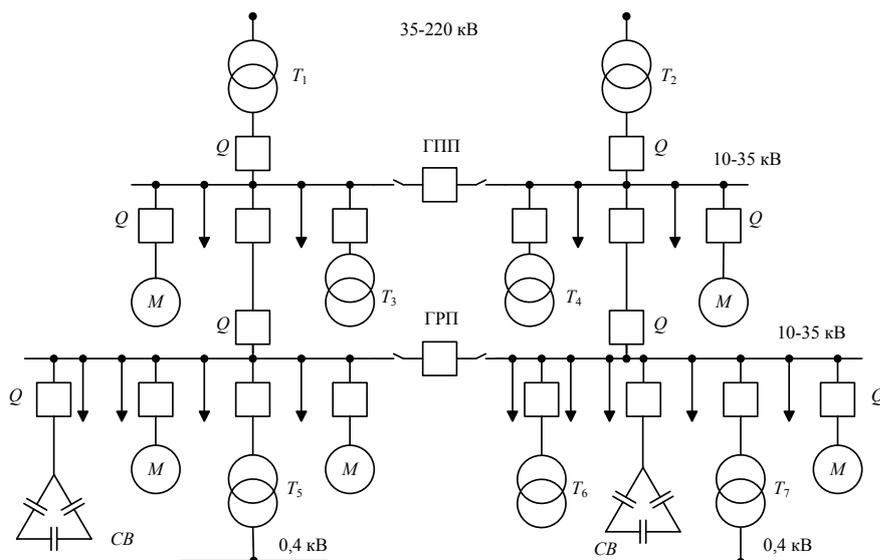


Рисунок 2.1 – Однолинейная схема системы электроснабжения промышленных предприятий

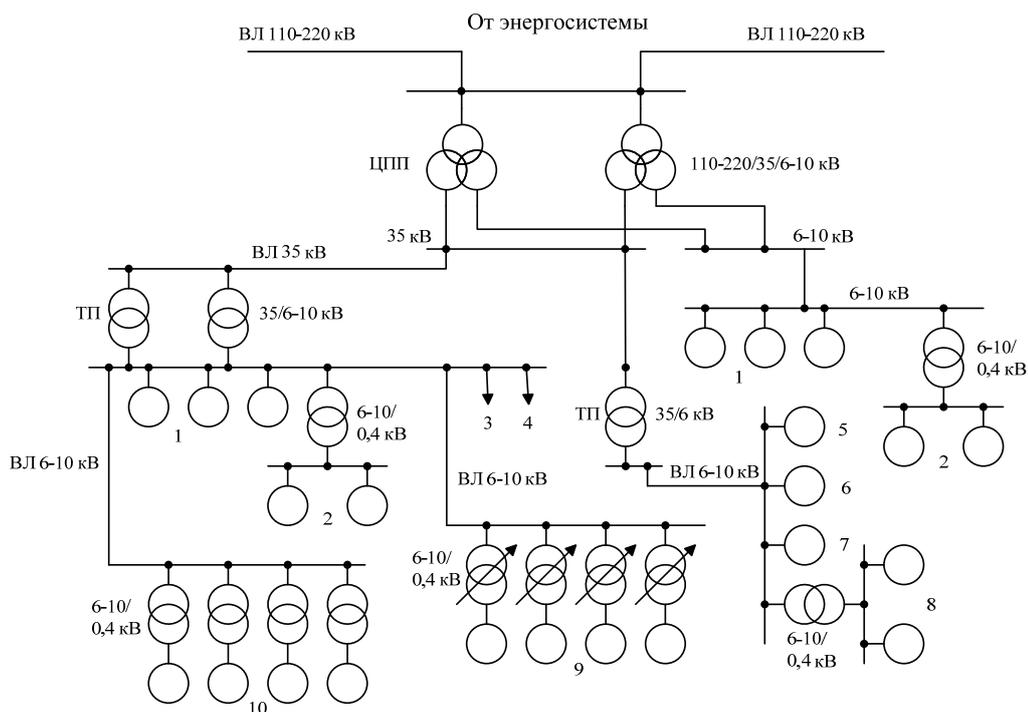


Рисунок 2.2 – Система электроснабжения нефтяных промыслов

На схеме (рисунок 2.1) использованы следующие обозначения:  $T_1 - T_7$  – силовые трансформаторы; ГПП – главная понизительная подстанция; ГРП – главная распределительная подстанция;  $M$  – машины переменного тока;  $CB$  – конденсаторная батарея.

На схеме (рисунок 2.2) обозначены: ЦПП – центральная понизительная подстанция; ВЛ – воздушная линия; ТП – трансформаторная подстанция; 1 – электродвигатели насосов закачки воды в пласты; 2 – электродвигатели вспомогательных механизмов кустовой насосной станции; 3, 4 – электродвигатели насосов внешней перекачки нефти; 5 – электродвигатели буровой лебедки; 6 – электродвигатели буровых насосов; 7 – электродвигатели ротора; 8 – электродвигатели вспомогательных механизмов; 9 – электродвигатели погружных насосов; 10 – электродвигатели станков-качалок.

Для электроприводов насосной станции применяют синхронные двигатели серии СТД мощностью 1250, 1600, 2500 кВт и асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором на меньшие мощности.

В системах электроснабжения с асинхронными и синхронными электродвигателями, включая и системы (рисунки 2.1, 2.2), можно выделить их общий элемент, названный схемой обобщенной системы электроснабжения (СЭС), однолинейная схема которой представлена на рисунке 2.3.

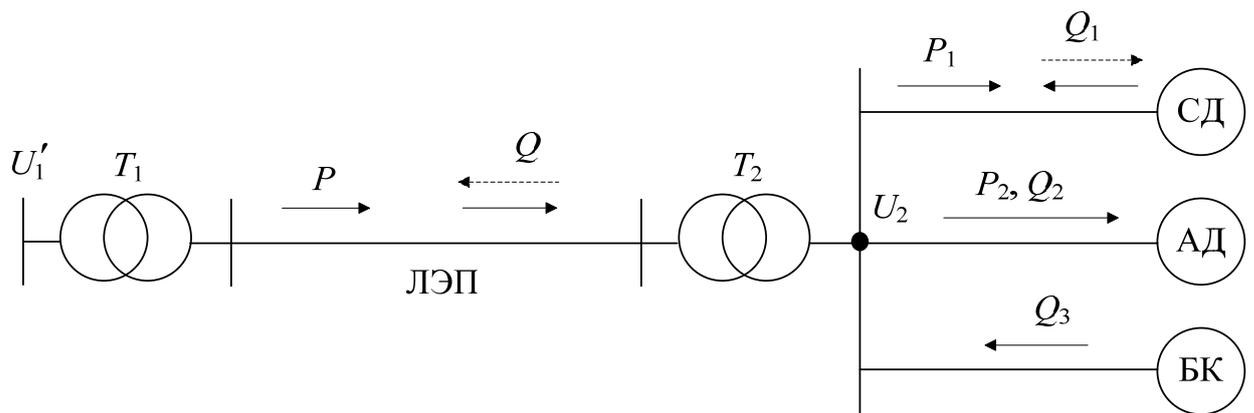


Рисунок 2.3 – Однолинейная схема обобщенной СЭС

В ее состав входят: один или два силовых трансформатора  $T_1$  и  $T_2$ ; воздушная или кабельная линия электропередач ЛЭП; батарея конденсаторов БК; асинхронные и синхронные двигатели АД и СД.

На однолинейной схеме имеются следующие обозначения:  $U_1'$  – напряжение на первичных обмотках трансформатора  $T_1$ ;  $U_2$  – напряжение на вторичных обмотках трансформатора  $T_2$ ;  $P, P_1, P_2$  – активные мощности соответственно ЛЭП, СД, АД;  $Q, Q_1, Q_2, Q_3$  – реактивные мощности соответственно ЛЭП, СД, АД, БК.

Реактивные мощности  $Q$  и  $Q_1$  могут иметь знак как «+», так и «-» в зависимости от отдачи либо потребления реактивной мощности узлом нагрузки и режима работы синхронного двигателя.

В качестве примеров в работе рассматриваются СЭС машиностроительного предприятия (МСП) и СЭС кустовой насосной станции (КНС), которые являются элементами схем, представленных на рисунках 2.1 и 2.2.

В состав СЭС МСП входят:  $T_1$  – ТМ 6300/110/6,3; синхронная нагрузка – синхронный двигатель СТД 1250; асинхронная нагрузка – асинхронные двигатели суммарной мощностью  $P = 3000$  кВт и средним коэффициентом мощности  $\cos \varphi = 0,85$ ; БК – батарея конденсаторов мощностью до 900 кВАр.

В состав СЭС КНС входят:  $T_1$  – ТГТН 25000/110/35/6; ЛЭП – провод АС 120/19;  $T_2$  – ТМН 4000/35/6; СД – СТД 1250; АД – асинхронные двигатели суммарной мощностью  $P = 1590$  кВт (А113-4М, А114-4М, 4АР225М4 и др.).

## 2.1 Динамические характеристики синхронной машины

### 2.1.1 Общие замечания

Синхронные двигатели в силу ряда преимуществ находят все более широкое применение для привода различных механизмов, не требующих частых пусков. Синхронные двигатели могут применяться для центробежных и поршневых насосов и компрессоров, воздуходувок, шаровых и мукомольных мельниц, прокатных станов, а также для электроприводов с ударной нагрузкой. В последнее время синхронные двигатели стали применяться и для механизмов, требующих регулирования скорости.

Главное преимущество синхронных двигателей, например, перед асинхронными заключается в том, что путем изменения тока возбуждения можно изменять

величину реактивной мощности. В зависимости от величины тока возбуждения реактивная мощность может выдаваться в сеть (при перевозбуждении) и потребляться из сети (при недовозбуждении). Синхронные двигатели обычно выполняются для работы с опережающим коэффициентом мощности, т.е. для выдачи реактивной мощности в сети.

Перегрузочная способность синхронных электродвигателей в меньшей степени зависит от напряжения в сети, так как максимальный момент у асинхронных двигателей пропорционален  $U_c^2$ , а у синхронных двигателей –  $U_c$ . Коэффициент полезного действия синхронных двигателей выше, чем у асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, так как из-за большей величины воздушного зазора добавочные потери в стали и пусковой обмотке у синхронных двигателей значительно меньше.

Несмотря на более сложную конструкцию синхронных двигателей, их преимущество столь велико, что при мощности свыше трехсот киловатт их целесообразно применять повсюду, где не требуется регулирование частоты вращения и частых пусков и остановок (мельницы, вентиляторы, насосы, компрессоры, дробилки и т.д.).

### **2.1.2 Уравнения электромагнитных процессов синхронной машины**

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

Для синхронной машины, насчитывающей шесть контуров, составляют систему из шести уравнений: три для фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , одно для обмоток возбуждения и

два для продольного и поперечного демпферных контуров. Потокосцепления в них связаны с токами контуров шестью уравнениями через индуктивности и взаимоиндуктивности обмоток соответствующих контуров. Индуктивности и взаимоиндуктивности (за исключением машин с неявновыраженными полюсами) являются периодическими функциями угла  $\gamma = \omega_0 t$ , где  $\omega_0$  – синхронная частота вращения, а  $t$  – текущее время.

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

Очень часто в полученной системе уравнений не учитывают уравнения демпферных контуров, а их действие учитывается при определении коэффициентов демпфирования в уравнении электромеханических процессов. В этом случае система уравнений упрощается с пяти до трех уравнений [12, 74, 77, 91]:

$$\begin{aligned} x_{ad} \frac{dI_f}{\omega_0 dt} + RI_d + x_q I_q &= -U_d; \\ -x_d I_d - E_q + RI_q &= -U_q; \\ \frac{3}{2} x_d \frac{dI_d}{\omega_0 dt} + x_f \frac{dI_f}{\omega_0 dt} + R_f I_f &= U_f, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $x_d$ ,  $x_q$ ,  $x_{ad}$  – соответственно индуктивные сопротивления по продольной оси  $d$ , по поперечной оси  $q$ , взаимоиндукции между обмоткой возбуждения и фазными обмотками;  $x_f$ ,  $R_f$  – индуктивное и активное сопротивление обмотки возбуждения;  $I_d$ ,  $I_q$  – токи машины по осям  $d$  и  $q$ ;  $E_q$  – ЭДС по оси  $q$ , наводимая потоками обмотки возбуждения в фазных обмотках статора;  $U_d$ ,  $U_q$  – напряжения машины по осям  $d$  и  $q$ ;  $R$  – активное сопротивление фазной обмотки. В уравнениях (2.1) не учитываются электромагнитные переходные процессы в статорных обмотках, что дает основание [77] для их записи относительно действующих значений  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $U_d$ ,  $U_q$ .

### 2.1.3 Математическая модель электромеханических процессов синхронной машины

Уравнения движения ротора машины

$$J \frac{d\omega_M}{dt} = \pm \omega_{MH}^{-1} (P_{\Pi} - P_c - P_a), \quad (2.2)$$

где  $J$  – момент инерции ротора машины совместно с приводимым механизмом или приводной турбиной;  $P_{\Pi}$  – мощность приводимого в движение механизма у синхронного двигателя и мощность приводного двигателя у синхронного генератора;  $P_c, P_a$  – синхронная и асинхронная мощность машины; знак плюс для генераторного режима, а знак минус для двигательного режима;  $\omega_M, \omega_{MH}$  – текущее и номинальное значение угловой скорости машины.

Синхронная мощность неявнополюсной машины

$$P_c = P_{CM} \sin \theta \quad (2.3)$$

является синусоидальной функцией внутреннего угла  $\theta$  и пропорциональна величине максимальной мощности

$$P_{CM} = \frac{U_2 E_q}{x_d}, \quad (2.4)$$

где  $U_2, E_q$  – линейные значения напряжения сети и ЭДС машины по поперечной оси  $q$ ;  $x_d$  – индуктивное сопротивление машины по продольной оси  $d$ .

Асинхронная мощность

$$P_a = \frac{P_{aM}}{s_M} s, \quad (2.5)$$

где  $P_{aM}, s_M$  – максимальные значения мощности и скольжения.

Внутренний угол машины

$$\theta = \begin{cases} p_M \int (\omega_M - \omega_{MH}) dt, & \text{режим генератора (Г)} \\ p_M \int (\omega_{MH} - \omega_M) dt, & \text{режим двигателя (Д)}, \end{cases} \quad (2.6)$$

где  $p_M$  – число пар полюсов машины.

После первичного дифференцирования

$$\frac{d\theta}{dt} = \begin{cases} p_M (\omega_M - \omega_{MH}), & \text{режим Г} \\ p_M (\omega_{MH} - \omega_M), & \text{режим Д,} \end{cases} \quad (2.7)$$

вторичного –

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \begin{cases} p_M \frac{d\omega_M}{dt}, & \text{режим Г} \\ -p_M \frac{d\omega_{MH}}{dt}, & \text{режим Д.} \end{cases} \quad (2.8)$$

Скольжение

$$s = \begin{cases} \omega_{MH}^{-1} (\omega_M - \omega_{MH}), & \text{режим Г} \\ \omega_{MH}^{-1} (\omega_{MH} - \omega_M), & \text{режим Д,} \end{cases}$$

а с учетом (2.7)

$$s = \frac{d\theta}{p_M \omega_{MH} dt}. \quad (2.9)$$

Из совместного рассмотрения (2.3) – (2.9) следует, что

$$\frac{\omega_{MH} J d^2\theta}{p_M dt^2} = P_{\Pi} - P_c - P_a$$

или

$$\frac{\omega_{MH} J d^2\theta}{p_M dt^2} + \frac{P_{aH}}{p_M s_H \omega_{MH}} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{U_2 E_q}{x_d} \sin \theta = P_{\Pi}.$$

После линеаризации и записи в операторной форме, получим

$$(T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_1 T_1 p + 1) \Delta\theta(p) = k_1 \frac{\Delta E_q(p)}{E_{q0}} + k_2 \frac{\Delta P_{\Pi}(p)}{P_{cM}} + k_1 \frac{\Delta U_2(p)}{U_{02}}$$

или

$$\Delta\theta(p) = W_1(p) \left( k_1 \frac{\Delta E_q(p)}{E_{q0}} + k_1 \frac{\Delta U_2(p)}{U_{02}} + k_2 \frac{\Delta P_{\Pi}(p)}{P_{cM}} \right), \quad (2.10)$$

где

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_1 T_1 p + 1};$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{J}{p_M m_{cM} M_H \cos \theta_0}}; \quad k_1 = -tg \theta_0; \quad k_2 = \frac{1}{\cos \theta_0}; \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{m_{кр} M_H}{2s_{кр} \omega_{MH} \sqrt{p_M m_{cM} M_H J \cos \theta_0}}; \quad m_{cM} = \frac{M_{эм}}{M_H}; \quad m_{кр} = \frac{M_{кр}}{M_H}.$$

### 2.1.4 Обобщенная модель синхронной машины при управлении ее возбуждением

Построение системы автоматического управления возбуждением синхронной машины базируется на ее математической модели. Специфика этой системы заключается в том, что она содержит один регулятор и несколько обратных связей по различным переменным. Аналитических методов синтеза таких систем пока еще нет. Поэтому основным методом синтеза служит метод электродинамического моделирования на ЭВМ. В связи с аппаратной ограниченностью существовавших моделирующих установок применение нашли, в основном, упрощенные модели машин.

В настоящее время широкое распространение получили современные информационные технологии (Matlab Simulink и др.), использование которых снимает аппаратные ограничения в применении более полных моделей.

Систему операторных уравнений синхронного генератора в приращениях можно получить из (2.1) при  $U_q = U_2 \cos\theta$  и  $U_d = U_2 \sin\theta$ :

$$\Delta I_d(p) = -\frac{X_q}{R} \Delta I_q(p) - T_{ad} p \Delta I_f(p) - \frac{\sin \theta_0 \Delta U_2(p)}{R} - \frac{U_{02}}{R} \cos \theta_0 \Delta \theta(p); \quad (2.12)$$

$$\Delta I_q(p) = \frac{X_d}{R} \Delta I_d(p) + \frac{X_{ad}}{R} \Delta I_f(p) + \frac{U_{02}}{R} \sin \theta_0 \Delta \theta(p) - \frac{\sin \theta_0 \Delta U_2(p)}{R}; \quad (2.13)$$

$$\Delta I_f(p) = \left( \frac{1}{R_f} \Delta U_f(p) - \frac{3R}{2R_f} T_{ad} p \Delta I_d(p) \right) \frac{1}{T_f p + 1}, \quad (2.14)$$

где  $T_d = \frac{X_d}{\omega_0 R}$ ;  $T_q = \frac{X_q}{\omega_0 R}$ ;  $T_{ad} = \frac{X_{ad}}{\omega_0 R}$ ;  $T_f = \frac{X_f}{\omega_0 R_f}$ ;  $U_{02}$  – установившееся значение напряжения.

Операторным уравнением (2.10)-(2.14) соответствует структурная схема, представленная на рисунке 2.4.

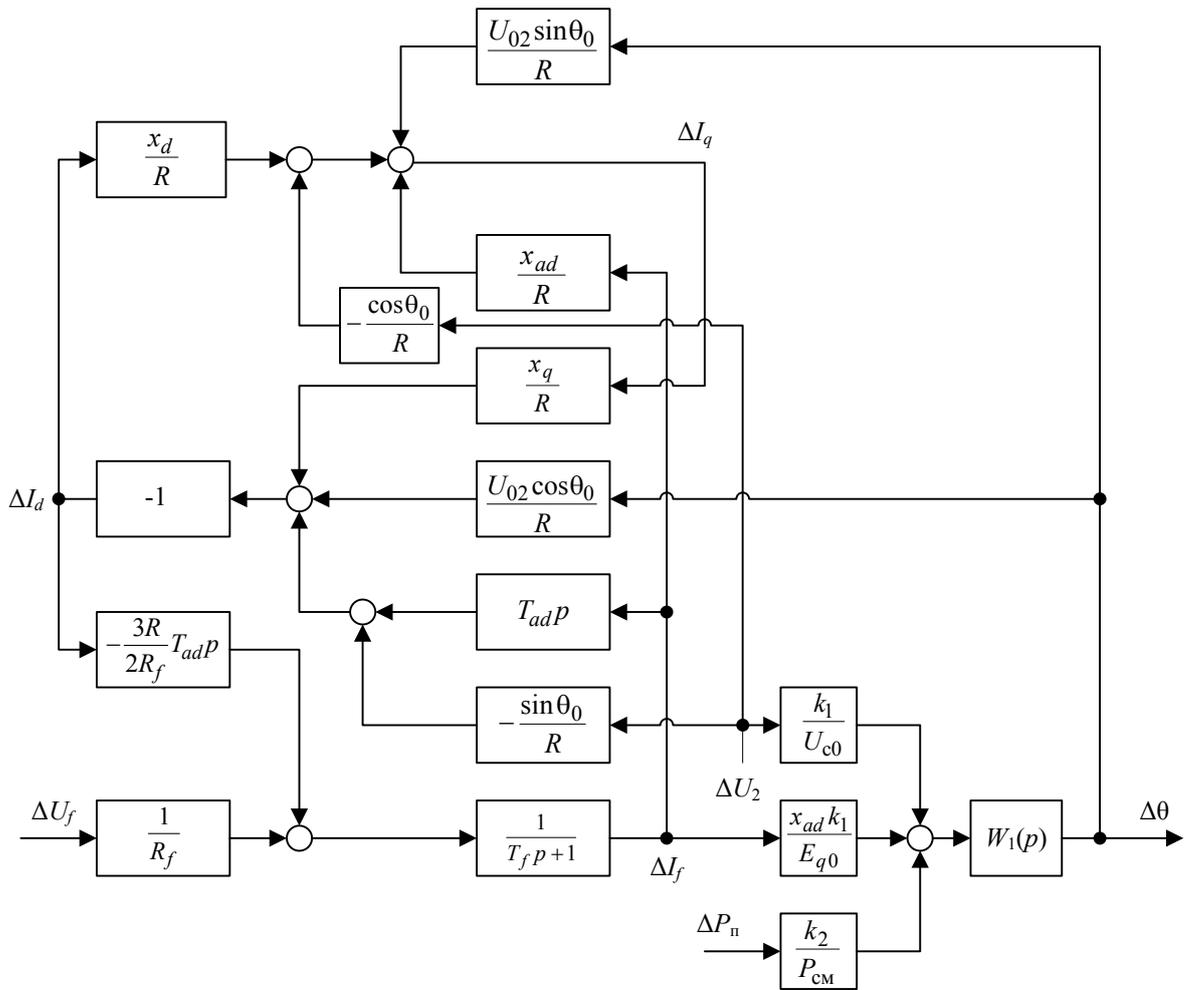


Рисунок 2.4 – Структурная схема СМ в именованных единицах

Если уравнения (2.12), (2.13) объединить в одно (2.15):

$$\Delta I_d(p) = -W_2(p) \left[ \left( T_{ad} + \frac{x_{ad}}{x_d c_0 c_1(p)} \right) \Delta I_f(p) + W_4'(p) \Delta \theta(p) + W_5'(p) \Delta U_2(p) \right], \quad (2.15)$$

где

$$W_2(p) = \frac{c_0}{(1+c_0) \left[ \frac{c_0}{1+c_0} T_d T_q p^2 + \frac{c_0}{1+c_0} (T_d + T_q) + 1 \right]}; \quad c_0 = \frac{R^2}{x_d x_q};$$

$$W_4'(p) = \left( \frac{\sin \theta_0}{x_d c_0} + \frac{\cos \theta_0}{R} \right) U_{02}; \quad W_5'(p) = -\frac{\cos \theta_0}{x_d c_0} + \frac{\sin \theta_0}{R},$$

то по уравнениям (2.10), (2.14), (2.15) можно построить более простую схему (рисунок 2.5).

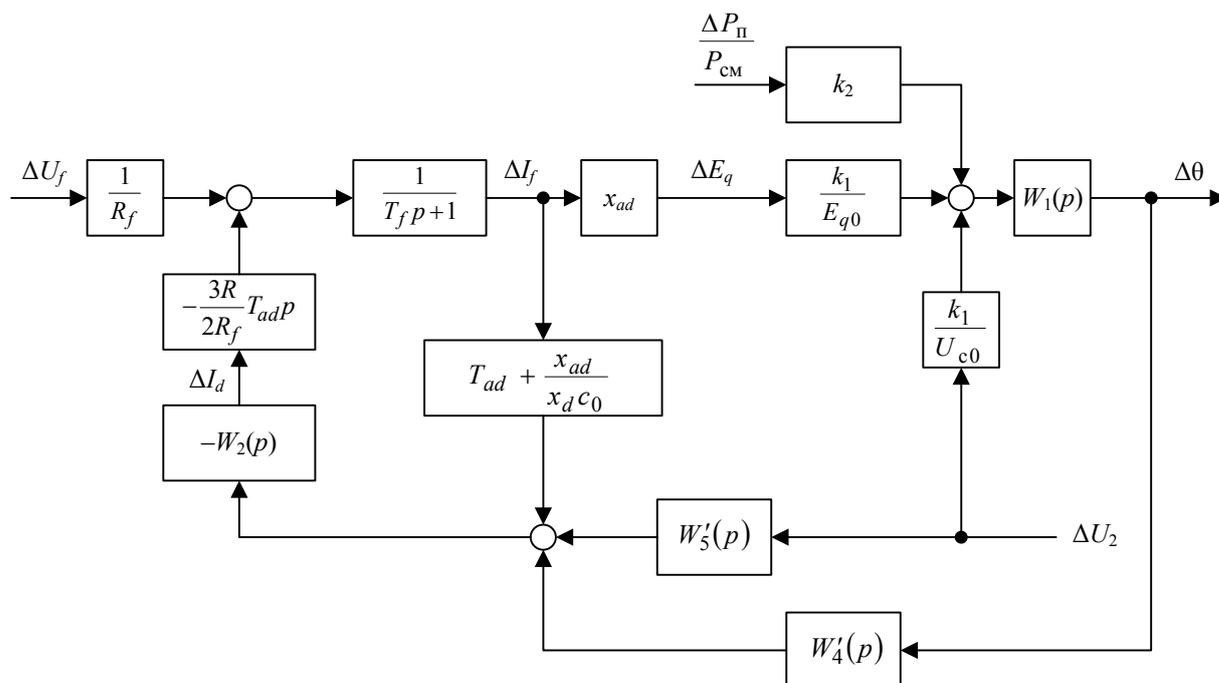


Рисунок 2.5 – Упрощенная схема синхронной машины

Преобразованная структурная схема синхронной машины представлена на рисунке 2.6. [49-51, 54, 55]

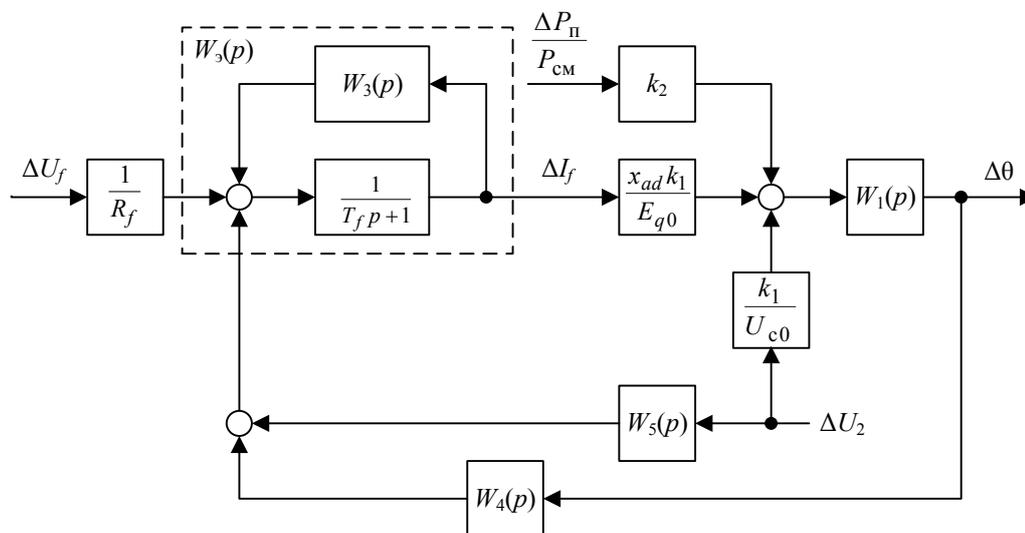


Рисунок 2.6 – Преобразованная схема синхронной машины

На схеме (рисунок 2.6) обозначены:

$$W_3(p) = \frac{3RT_{ad}p}{2R_f} W_2(p) \left( T_{ad} + \frac{x_{ad}}{x_d c_0} \right);$$

$$W_4(p) = \frac{3RT_{ad}p}{2R_f} W_2(p) W_4'(p);$$

$$W_5(p) = \frac{3RT_{ad}p}{2R_f} W_2(p)W_5'(p);$$

После исключения из выражений сопротивлений фазных обмоток двигателя ( $R = 0$ ) уравнение (2.15) представляется более простым уравнением

$$\Delta I_d(p) = -\frac{1}{x_d} [x_{ad}\Delta I_f(p) + U_{02} \sin \theta_0 \Delta \theta(p) - \cos \theta_0 \Delta U_2(p)],$$

а на структурной схеме (рисунок 2.6) соответствующие передаточные функции и постоянные времени будут равными:

$$\begin{aligned} W_3(p) &= \frac{3x_{ad}^2}{2\omega x_d R_f} p; \\ W_4(p) &= T_{д1}p; \quad T_{д1} = \frac{3U_{02}X_{ad} \sin \theta_0}{2\omega R_f X_d}; \\ W_5(p) &= -T_{д2}p; \quad T_{д2} = \frac{X_{ad} \cos \theta_0}{\omega R_f x_d}; \end{aligned} \tag{2.16}$$

$$W_9(p) = \frac{1}{T_f'p + 1}; \quad T_f' = \frac{x_d'}{x_d} T_f; \quad x_d' = x_d - \frac{3X_{ad}^2}{2x_f}.$$

Если исключить из уравнений напряжение ( $\Delta U_2 = 0$ ), то структурная схема (рисунок 2.7) с передаточными функциями (2.16) и  $\Delta m(p) = \Delta P_{см} / P_{см}$  (относительная величина мощности (момента) на валу синхронного двигателя) совпадает с альтернативными схемами [74, 77, 99]. Следовательно совпадают и их переходные характеристики  $\Delta \theta(t)$  по воздействиям  $\Delta U_f(t)$  и  $\Delta m(t)$ .

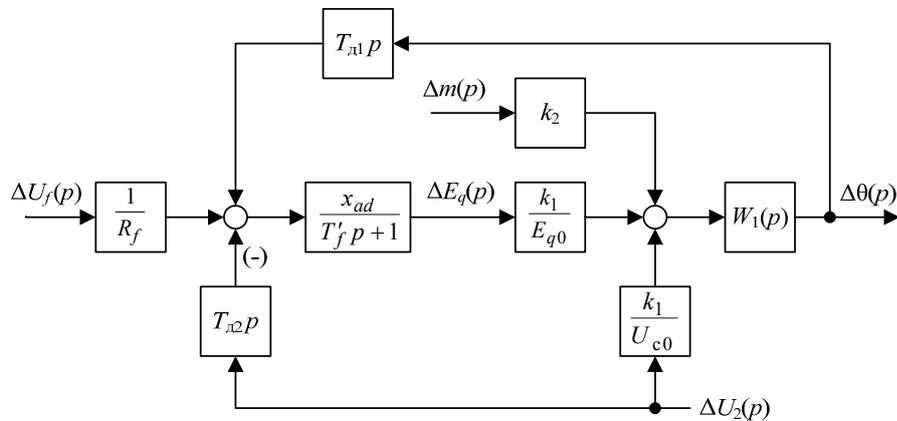


Рисунок 2.7 – Упрощенная структурная схема синхронной машины

Доказательство идентичности модели (рисунок 2.7) при  $\Delta U_2(p) = 0$  и модели, представленной в [77] уравнением (4.28) электромагнитных процессов

$$\Delta E_{q0} = (T'_d p' + 1)\Delta E_q - T'_d \left( \frac{x_d}{x'_d} - 1 \right) U_0 \sin \theta_0 p' \Delta \theta, \quad (2.16a)$$

где

$$\Delta E_{q0} = x_{ad} \Delta I_{f0} = x_{ad} \frac{\Delta U_f}{R_f}; \Delta E_q = x_{ad} \Delta I_f; p' = \frac{p}{\omega_0}; p = \frac{1}{dt}; \quad (2.16б)$$

$$T'_d = T_{d0} \frac{x'_d}{x_d}; T_{d0} = \frac{x_f}{R_f}; x'_d = x_d - \frac{3x_{ad}^2}{x_f}$$

и уравнением (4.7) электромеханических процессов

$$Jp\omega = \omega^{-1}(P_c + P_a - P_{\Pi}). \quad (2.16в)$$

После соответствующих преобразований уравнения (2.16a) с учетом (2.16б) получено

$$\Delta I_f(p) = \frac{1}{T'_f p + 1} \left( \frac{\Delta U_f(p)}{R_f} - T_{d1} p \Delta \theta(p) \right). \quad (2.16г)$$

А из (2.16в) получено операторное уравнение (2.10). Уравнениям (2.10) и (2.16г) соответствует структурная схема (рисунок 2.7) при  $\Delta U_2(p) = 0$ , что и требовалось доказать.

### 2.1.5 Определение параметров синхронного двигателя

Неявнополюсный синхронный двигатель марки СТД-1250:  $S_H = 1450$  кВА;  $P_H = 1250$  кВА; опережающий  $\cos \varphi_H = 0,9$ ;  $\omega_H = 314$  рад/с; кратность пускового тока  $i_{\Pi} = 6,48$ ; кратность синхронного момента  $m_{см} = 1,67$ ; кратность максимального асинхронного момента  $m_{кр} = 1,27$ ; критическое скольжение  $s_{кр} = 0,05$ ; момент инерции ротора  $J_p = 25$  кг·м<sup>2</sup>; момент инерции механизма  $J_{мех} = 510$  кг·м<sup>2</sup>; число пар полюсов  $p_m = 1$ ;  $U_H = 6$  кВ; максимальное напряжение обмотки возбуждения  $U_{f \max} = 46$  В; ток возбуждения  $I_{f \max} = 253$  А;  $\eta_H = 0,958$ ; постоянная времени обмотки возбуждения без учета реакции статора  $T_{f0} = 2,86$  с; с учетом реакции статора  $T'_f = 0,367$  с [87, 89].

Номинальные значения основных величин вычислены по формулам:

– ток статора

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_H};$$

– номинальный момент

$$M_H = 1000 \frac{P_H}{\omega_H};$$

– индуктивное номинальное сопротивление

$$x_H = \frac{U_H^2}{S_H};$$

– внутренний угол машины

$$\theta_H = \arcsin m_{\text{см}}^{-1}.$$

Их значения составили:  $I_H = 139,5$  А;  $M_H = 3980$  Н·м;  $x_H = 24,8$  Ом;  $\theta_H = 36,8^\circ$ .

Вычисленные значения параметров передаточной функции  $W_1(p)$  по формулам (2.11) в зависимости от величины момента инерции  $J$  синхронного электропривода приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

$J, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	31,9	127,5	535
$T_1, \text{с}$	0,075	0,155	0,38
$\varepsilon_1$	0,31	0,19	0,1

При вычислении одного из основных параметров машины – индуктивного сопротивления  $x_d$  можно воспользоваться формулой [17]

$$x_{*d} = 1,13 \frac{\sin \varphi_H + \sqrt{\left(m_{\text{см}} \frac{P_H}{S_H}\right)^2 - \cos^2 \varphi_*}}{\left(m_{\text{см}} \frac{P_H}{S_H}\right)^2 - 1} = 1,64$$

либо выражением [87]  $x_{*d} = \left(\eta_H \cos \varphi_H \sqrt{m_{\text{см}}^2 - 1} - \sin \varphi_*\right)^{-1} = 1,37$

или табличными данными [87]  $x_{*d} = 1,63$ .

Проблема определения  $x_{*d}$  усложняется еще и тем, что в разных справочниках значения  $m_{\text{см}}$  разные. Так в [76] эта величина  $m_{\text{см}} = 2,24$ , а в [87] –  $m_{\text{см}} = 1,67$ .

Номинальные значения ЭДС при номинальном напряжении  $U_{*H} = 1$  [87]

$$E_{*qH} = x_{*d} m_{cm} \eta_H \cos \varphi_H = 1,99$$

Из всех значений  $x_{*d} = [1,64; 1,37; 1,63]$  выбирается та величина, при которой с заданной погрешностью  $\delta_1 \leq 0,02$  удовлетворяется соотношение

$$\frac{E_{*qH} U_{*H} U_H^2 \eta_H}{P_H x_{*d} x_H} \sin \theta_H < \delta_1. \quad (2.17)$$

При  $x_{*d} = 1,37$ ,  $E_{*qH} = 1,99$ ,  $\theta_H = 36,8^\circ$ ,  $x_H = 24,8$  Ом,  $U_H = 6$  кВ,  $\eta_H = 0,958$ ,  $P_H = 1250$  кВА величина погрешности  $\delta_1 = 2,0$  %. При  $x_{*d} = 1,63$  погрешность  $\delta_1 = 27,6$  %.

При всех режимах некоторые параметры машины можно определить из векторных диаграмм, которые строят по выражению

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

Векторная диаграмма для номинального режима двигателя ( $U_H = 6$  кВ,  $\theta_H = 36,8^\circ$ ,  $\varphi_H = \arccos 0,9 = 25,8^\circ$ ) представлена на рисунке 2.8.

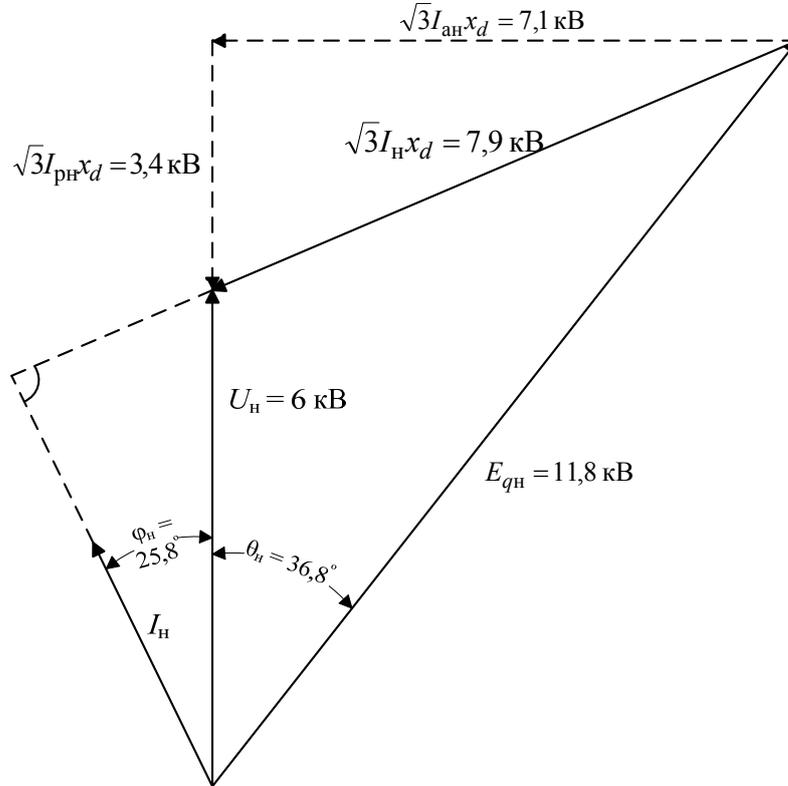


Рисунок 2.8 – Векторная диаграмма для номинального режима двигателя

Из векторной диаграммы

$$x_d = \frac{\sqrt{3}I_H x_d}{\sqrt{3}I_H} = \frac{7,9 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 139,5} = 32,7 \text{ Ом.}$$

Относительное индуктивное сопротивление

$$x_{*d} = \frac{x_d}{x_H} = 1,33.$$

Номинальное значение  $E_{qH} = 11,8$  кВ.

Погрешность определения  $x_d$  и  $E_{qH}$  согласно (2.17) составляет  $\delta_1 = 0,44\%$ .

При возбуждении отличным от номинального параметры машины удобно определять также из векторных диаграмм, в которых величина  $\sqrt{3}I_{aH}x_d = 7,1$  кВ считается известной, так как двигатель работает при постоянной нагрузке.

Построение диаграммы (рисунок 2.9) начинается с векторов  $\dot{U} = \dot{U}_H$ . Затем произвольно задаются например опережающим углом  $\varphi_1 = \varphi_H$  и проводят линию  $AC$  под прямым углом к вектору  $\dot{I}_1$  через конец вектора  $\dot{U}_H$  (точку  $B$ ) до пересечения с линией  $CD$ , отстоящей от вектора  $\dot{U}_H$  на расстояние длины отрезка  $BD$ , равной длине вектора  $\sqrt{3}I_{aH}x_d$ . Через точки  $O$  и  $C$  проводится вектор  $E_{q1}$  и определяется угол  $\theta_1$ .

Аналогично строят вектор  $E_{q2}$  и при  $\dot{I}_2 = 0$  (вектор  $\dot{I}_2$  совпадает с вектором  $\dot{U}_H$ ) и получают  $\theta_1 = 50^\circ$  и  $E_{q2} = 9,3$  кВ. При отстающем векторе  $\dot{I}_3$  на величину угла  $\varphi_3 = \varphi_H = 25,8^\circ$  величина  $E_{q2} = 7,6$  кВ, а  $\theta_3 = 68^\circ$ .

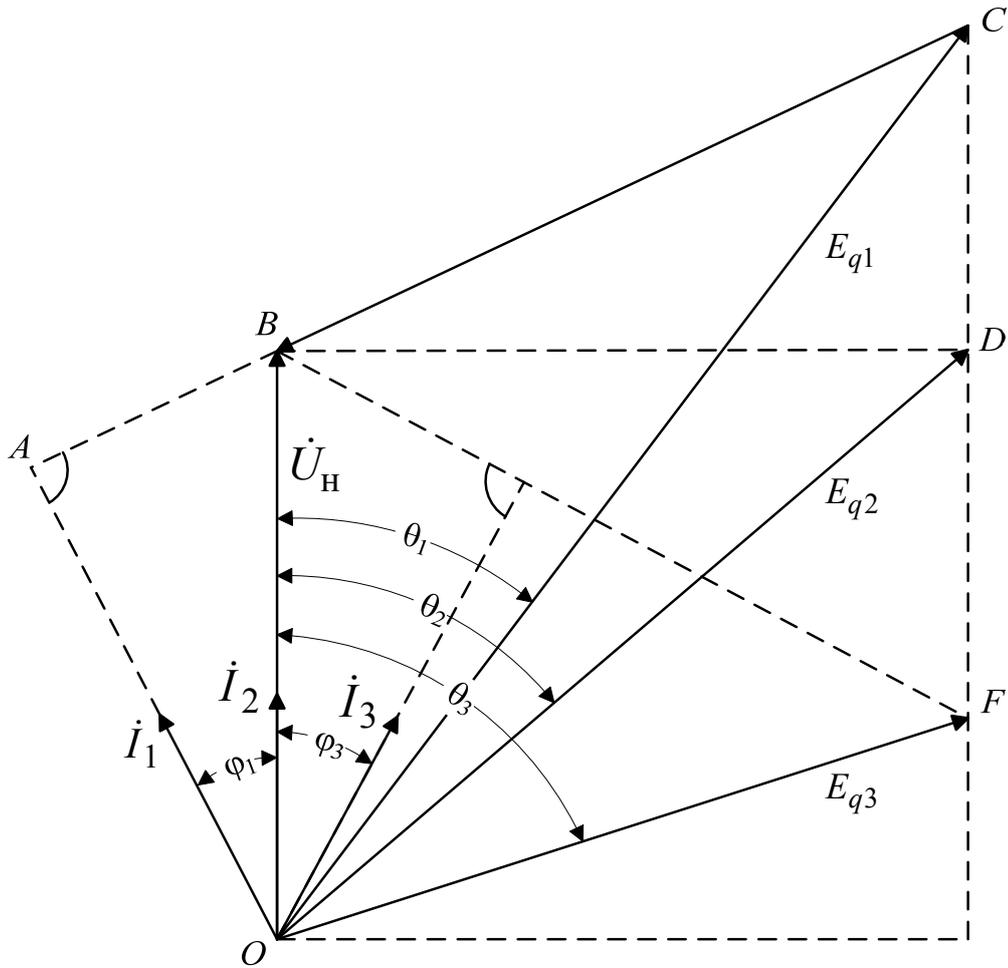
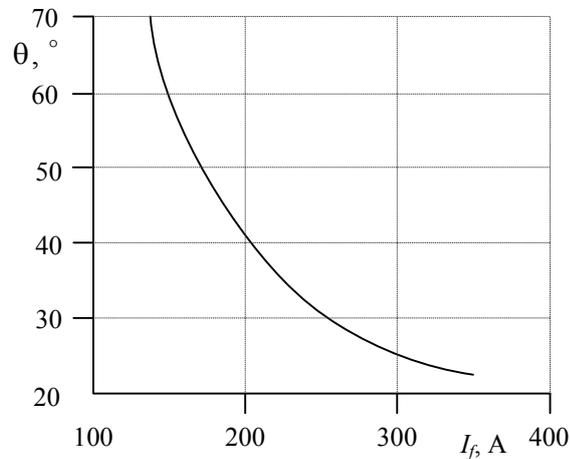


Рисунок 2.9 – Векторная диаграмма двигателя

На векторной диаграмме (рисунок 2.9) обозначены:  $E_{q1}$  – при опережающем угле  $\varphi_1$ ;  $E_{q2}$  – при  $\cos \varphi = 1$ ;  $E_{q3}$  – при отстающем угле  $\varphi_3$ .

На основе этих векторных диаграмм построены графики функций  $\theta = f_1(I_f)$ ,  $\cos \varphi = f_2(I_f)$  которые представлены на рисунках 2.10, 2.11.

Рисунок 2.10 – Зависимость угла нагрузки  $\theta$  от тока возбуждения  $I_f$

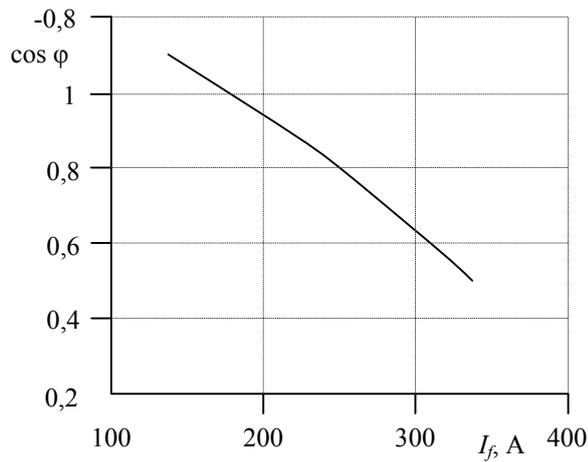


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от тока возбуждения  $I_f$

Зависимость угла нагрузки от ЭДС машины представлена на рисунок 2.12.

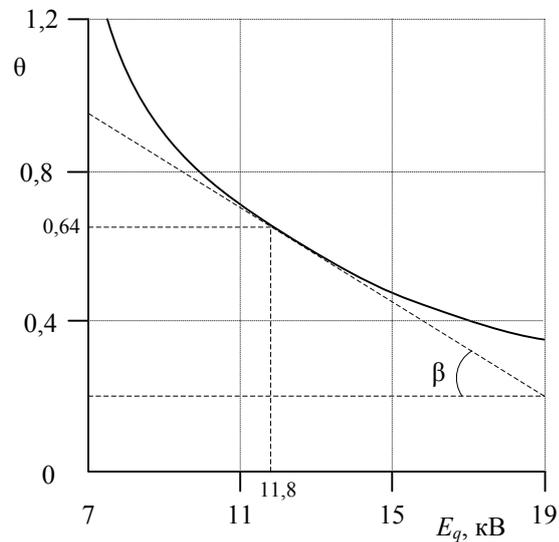


Рисунок 2.12 – Зависимость угла нагрузки  $\theta$  от ЭДС  $E_q$

Коэффициент передачи (2.11)

$$k_1 = \frac{\Delta \theta}{\Delta E_{*q}} = -\operatorname{tg} \theta_{\text{H}} = -0,75$$

имеет удовлетворительное совпадение с коэффициентом

$$k_1 = \frac{\Delta \theta}{\Delta E_{*q}} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{E_{q\text{H}}} = -0,72,$$

полученным из графика на рисунке 2.12.

Графики зависимостей (рисунки 2.10-2.12) позволяют получить значения соответствующих коэффициентов передачи двигателя при других величинах тока возбуждения и ЭДС, отличных от номинальных.

Индуктивное сопротивление самоиндукции  $x_{*ad}$  как коэффициент пропорциональности между синхронной фазной ЭДС  $E_{q\phi}$  и током возбуждения  $I_f$  можно найти из соотношения

$$x_{*ad} = x_{*d} - x_{*\sigma}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора [17]

$$x_{*\sigma} = x_{*d\Pi}'' - k,$$

где  $k = 0,0125$ .

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси в пусковом режиме ( $s = 1$ ) согласно характеристике (рисунок 1.7) [17] составляет  $x_{*d\Pi}'' = 0,133$ . Тогда  $x_{*\sigma} = 0,12$ .

Так как  $x_{*d} = 1,33$ , то  $x_{*ad} = 1,21$  или  $x_{ad} = 30$  Ом. Сопротивление взаимоиндукции, как коэффициент пропорциональности между линейным значением синхронной ЭДС  $E_q$  и током возбуждения [91]

$$E_q = X_{ad} I_f,$$

следует принять равным  $X_{ad} = \sqrt{3}x_{ad} = 52$  Ом.

Значение номинального тока возбуждения

$$I_{fн} = \frac{E_{qн}}{X_{ad}}$$

при  $E_{qн} = 11,8$  кВ составляет  $I_{fн} = 227$  А.

### 2.1.6 Переходные характеристики синхронного двигателя с выходной переменной углом нагрузки

Модель объекта с входными переменными  $\Delta U_f(p)$ ,  $\Delta m(p)$ ,  $\Delta U_2(p)$  и выходными величинами  $\Delta E_q(p)$ ,  $\Delta \theta(p)$  [49-61], реализованная в графической среде имитационного моделирования MATLAB Simulink, представлена на рисунке 2.13.

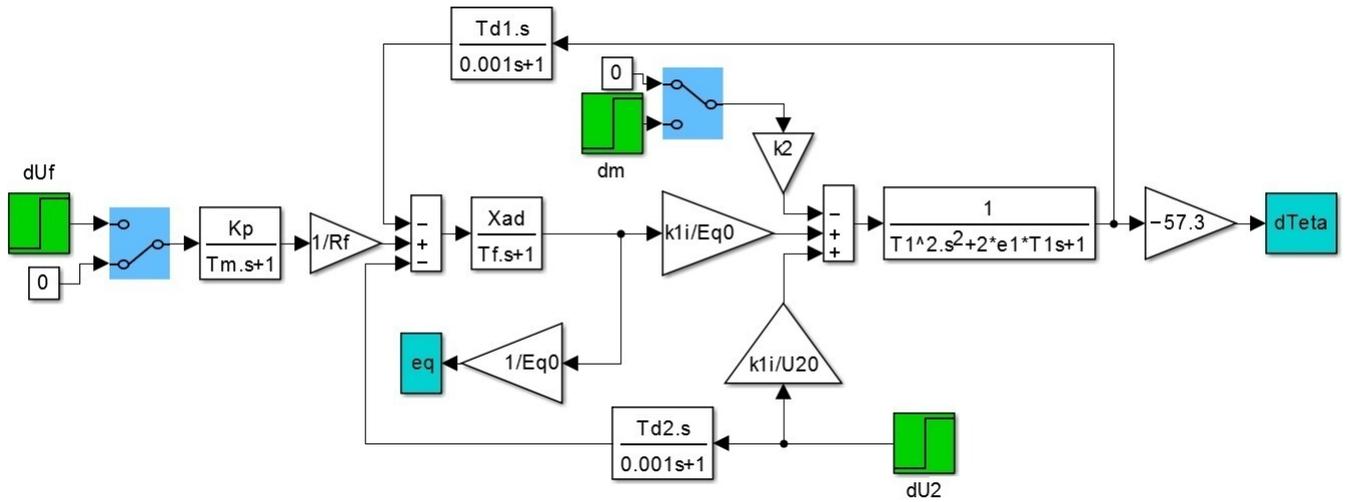


Рис. 2.13 – Математическая модель синхронного двигателя в графической среде имитационного моделирования MATLAB Simulink

Переходные характеристики  $\Delta\theta(t)$  и  $\Delta e(t) = \Delta E_q(t)/11800$  по управляющему воздействию  $\Delta U_f(t) = 0,1$  В при  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$  и  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$  представлены на рисунках 2.14, 2.15.

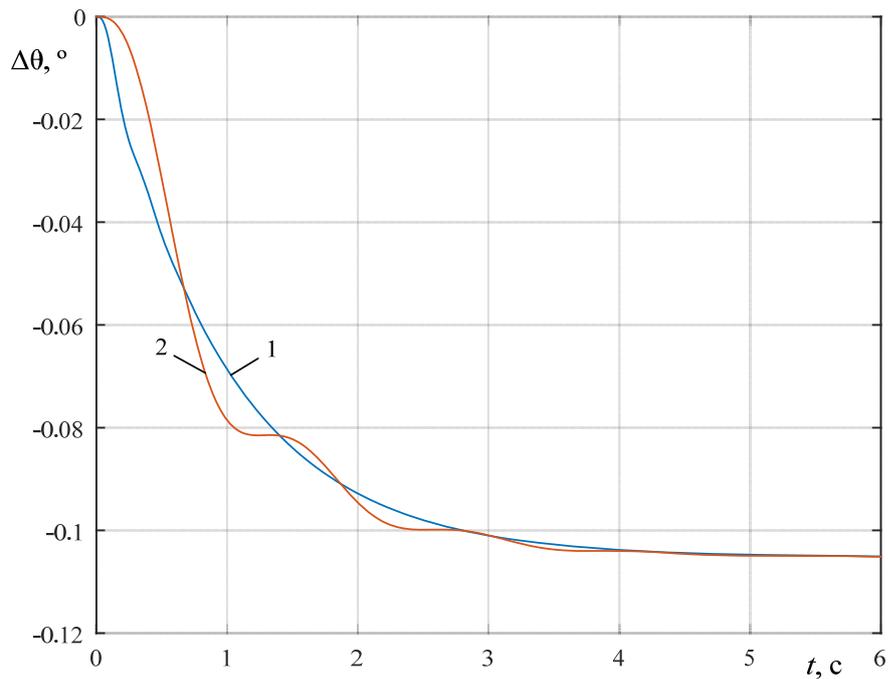


Рисунок 2.14 – Переходные характеристики  $\Delta\theta(t)$  по управляющему воздействию  $\Delta U_f(t) = 0,1$  В: 1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

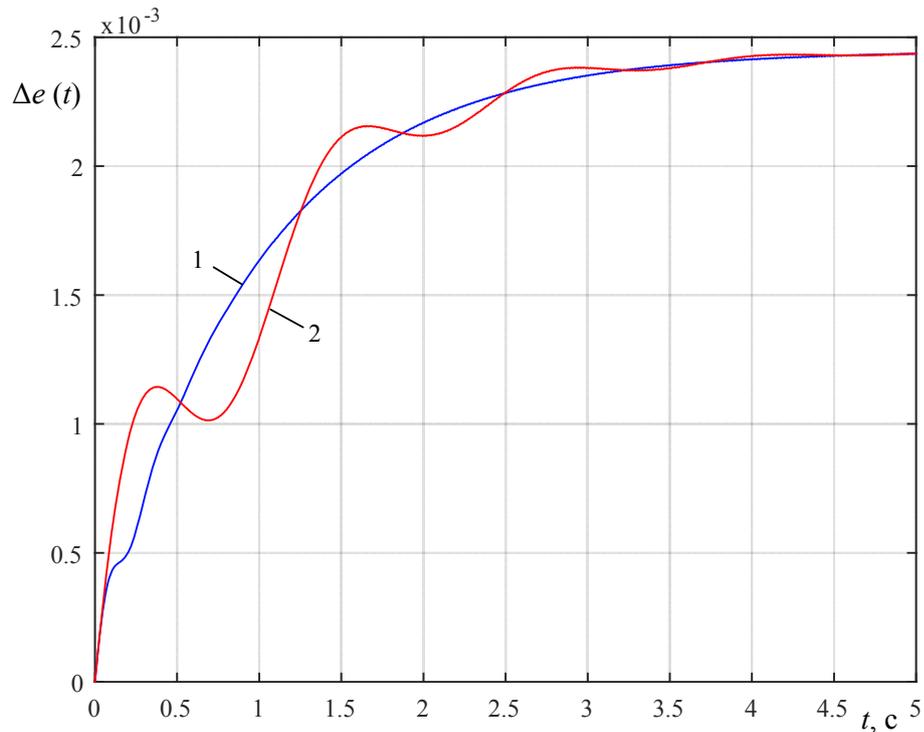


Рисунок 2.15 – Переходные характеристики  $\Delta e(t) = \Delta E_q(t)/11800$  по управляющему воздействию  $\Delta U_f(t) = 0,1$  В: 1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

Переходные характеристики  $\Delta\theta(t)$  и  $\Delta e(t) = \Delta E_q(t)/11800$  по возмущающему воздействию – моменту нагрузки  $\Delta m(t) = 0,1$  при  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$  и  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$  представлены на рисунках 2.16, 2.17.

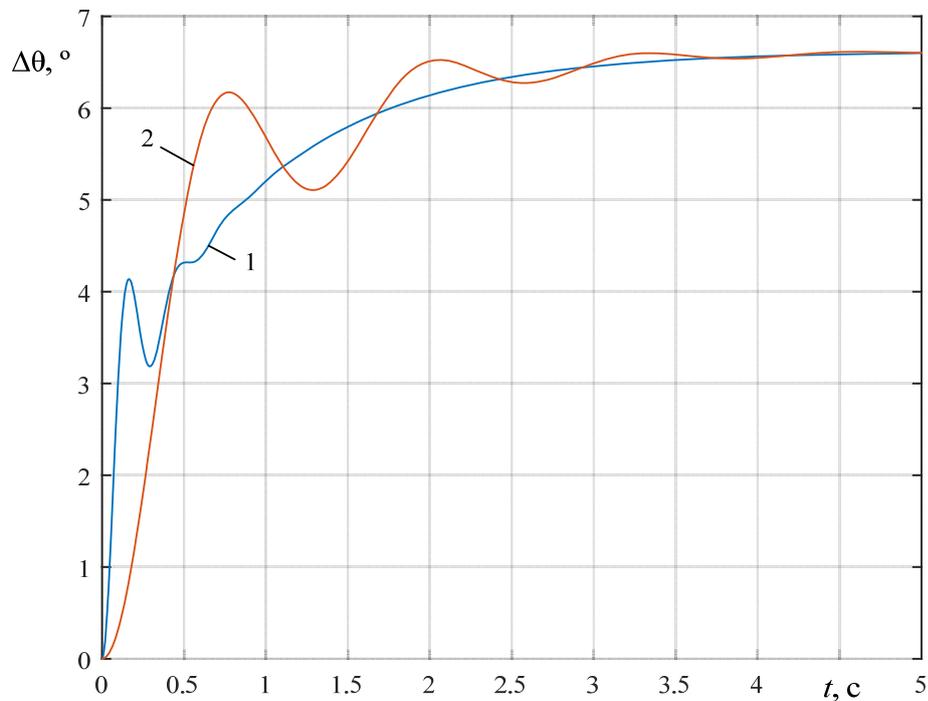


Рисунок 2.16 – Переходные характеристики  $\Delta\theta(t)$  по возмущающему воздействию  $\Delta m(t) = 0,1$ :  
1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

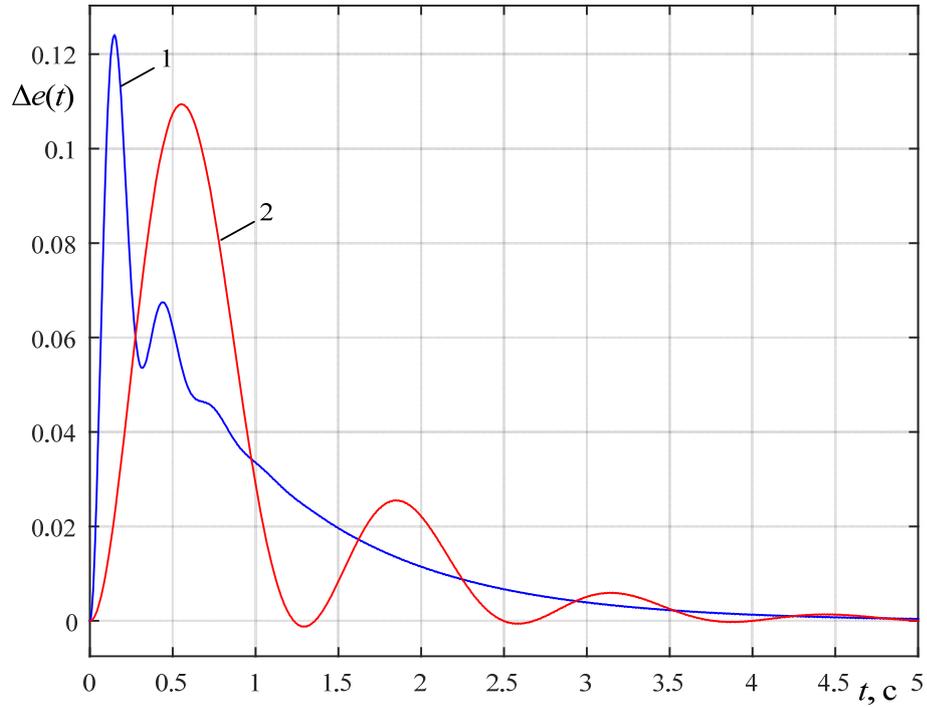


Рисунок 2.17 – Переходные характеристики  $\Delta e(t) = \Delta E_q(t)/11800$  по возмущающему воздействию  $\Delta m = 0,1(t)$ : 1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

Переходные характеристики  $\Delta\theta(t)$  и  $\Delta e(t) = \Delta E_q(t)/11800$  по возмущающему воздействию – напряжению узла нагрузки  $\Delta U_2(t) = 600$  В при  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$  и  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$  представлены на рисунках 2.18, 2.19.

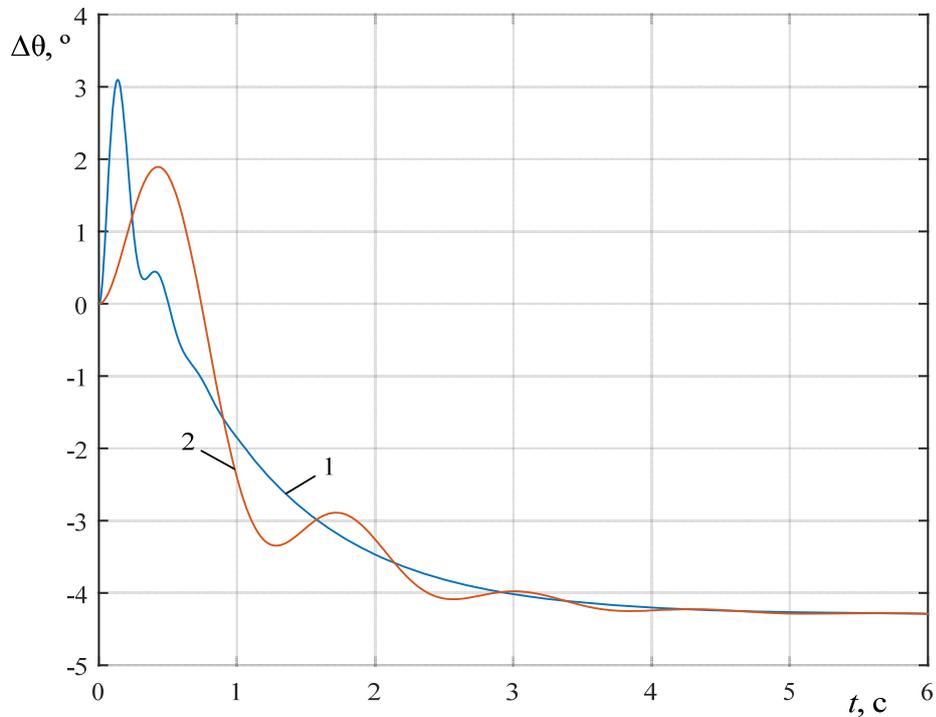


Рисунок 2.18 – Переходные характеристики  $\Delta\theta(t)$  по возмущающему воздействию  $\Delta U_2(t) = 600$  В: 1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

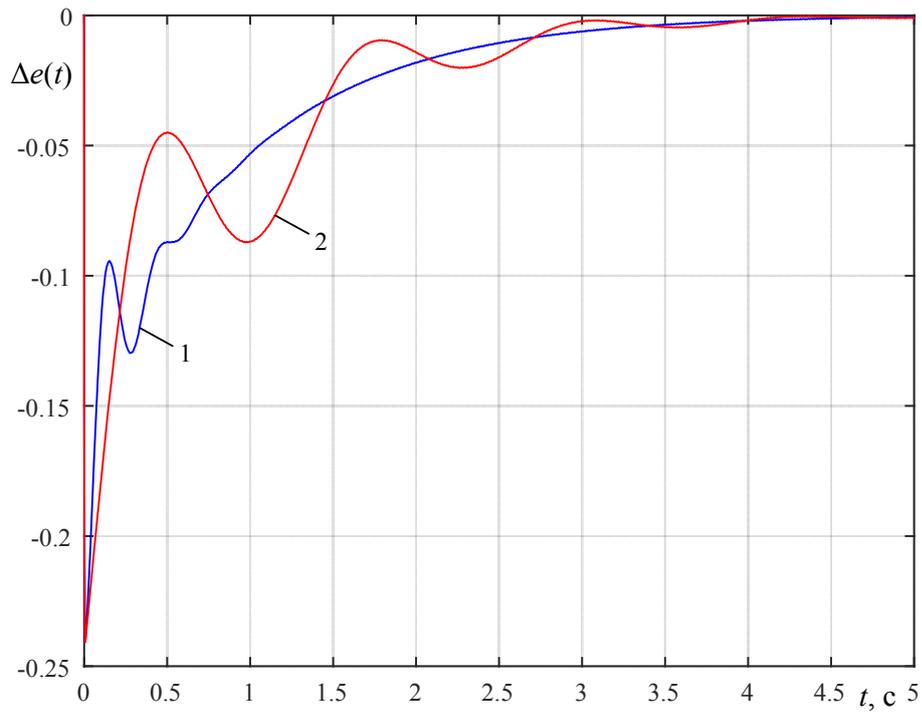


Рисунок 2.19 – Переходные характеристики  $\Delta e(t) = \Delta E_q(t)/11800$  по возмущающему воздействию  $\Delta U_2(t) = 600$  В: 1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

Из анализа переходных характеристик по управляющему воздействию (рисунки 2.14, 2.15) следует, что увеличение постоянной времени  $T_1$  и коэффициента демпфирования  $\varepsilon_1$  примерно в 4 раза приводит к увеличению времени регулирования от  $t_{p1} = 1,5$  с до  $t_{p1} = 4,2$  с и повышает колебательность от  $m_1 = 0$  до  $m_1 = 2$ .

Анализ переходных характеристик по возмущающим воздействиям (рисунки 2.16-2.19) показывают, что при увеличении  $T_1$  и  $\varepsilon_1$  в 4 раза показатель колебательности увеличивается в три раза, а время регулирования возрастает в  $5,5 \div 7,5$  раз.

### 2.1.7 Математическая модель синхронного двигателя с регулируемой переменной – реактивной мощностью

Реактивную мощность синхронной машины  $Q_1$  можно определить из векторной диаграммы [91]

$$Q_1 = \frac{U_2}{x_d} (E_q \cos \theta - U_2).$$

Реактивная мощность в приращениях

$$\Delta Q_1 = k_3 \Delta U_2 + k_4 \Delta \theta + k_5 \Delta E_q, \quad (2.18)$$

где  $k_3 = \frac{E_{q0} \cos \theta_0 - 2U_{20}}{x_d}$ ;  $k_4 = -\frac{U_{20} E_{q0}}{x_d} \sin \theta_0$ ;  $k_5 = \frac{U_{20} \cos \theta_0}{x_d}$ .

Приращение электромагнитной мощности синхронного двигателя

$$\Delta P_1(p) = k_6 \Delta m(p), \quad (2.19)$$

где  $k_6 = \frac{U_{02} E_{q0}}{x_d}$ .

Модель синхронного двигателя, построенная на основе схемы (рисунок 2.7) и выражений (2.18), (2.19) [53-61] представлена на рисунке 2.20.

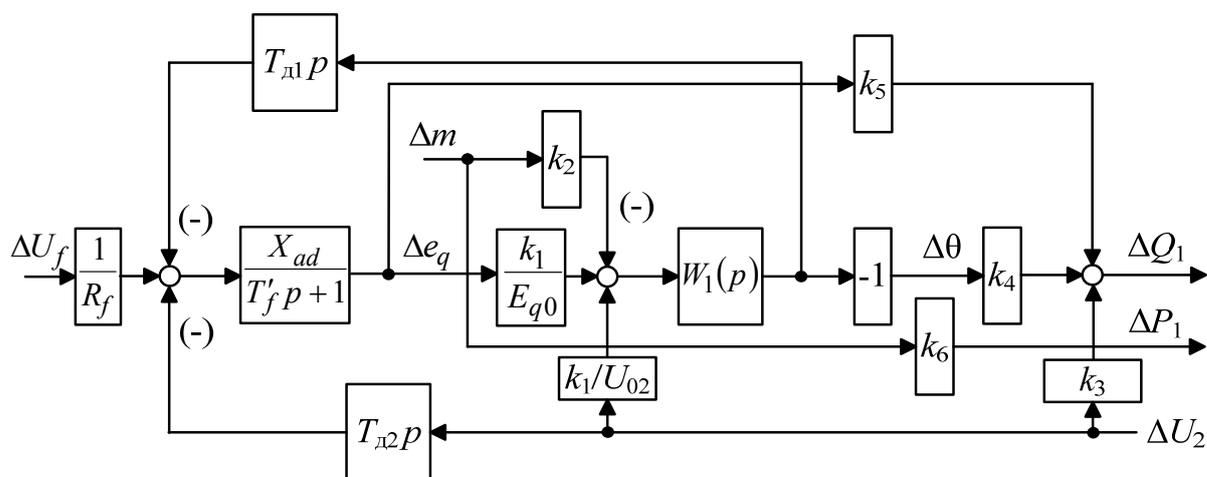


Рисунок 2.20 – Структурная схема синхронного двигателя с выходной переменной – реактивной мощностью  $Q_1$

Модель двигателя, реализованная в графической среде имитационного моделирования MATLAB Simulink представлена на рисунке 2.21.

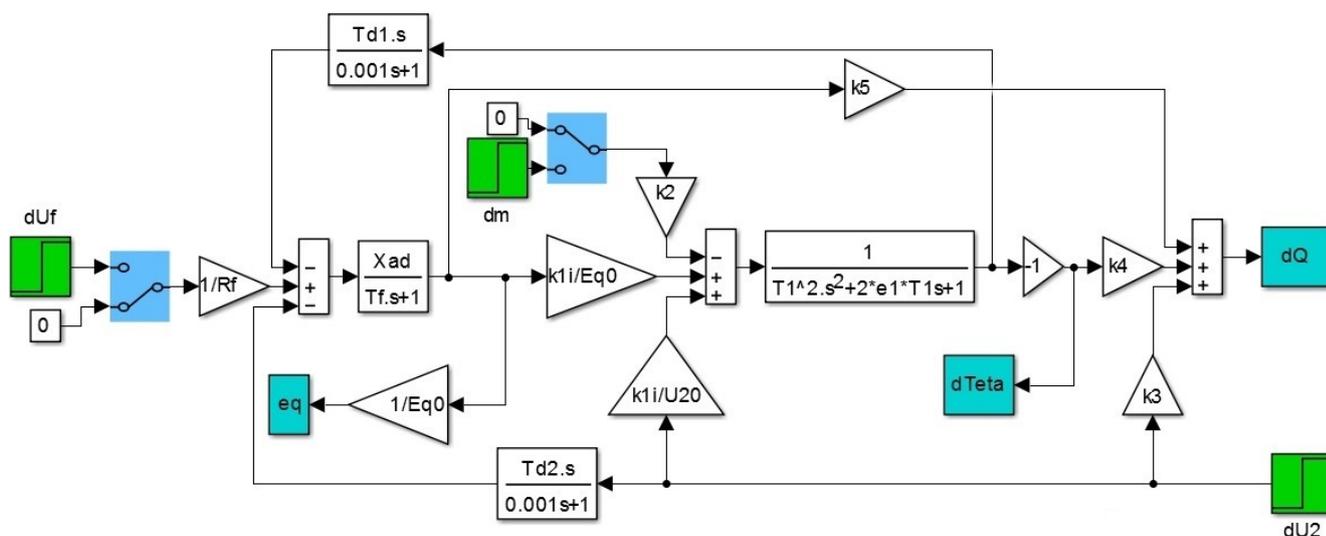


Рис. 2.21 – Модель синхронного двигателя с выходной переменной  $Q_1$  реализованная в графической среде имитационного моделирования MATLAB Simulink

Переходные характеристики  $\Delta Q_1(t)$  по управляющему воздействию  $\Delta U_f(t) = 0,1$  В и  $\Delta Q_1(t)$  по возмущающему воздействию  $\Delta m(t) = 0,1$  при  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$  и  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$  представлены на рисунках 2.22, 2.23.

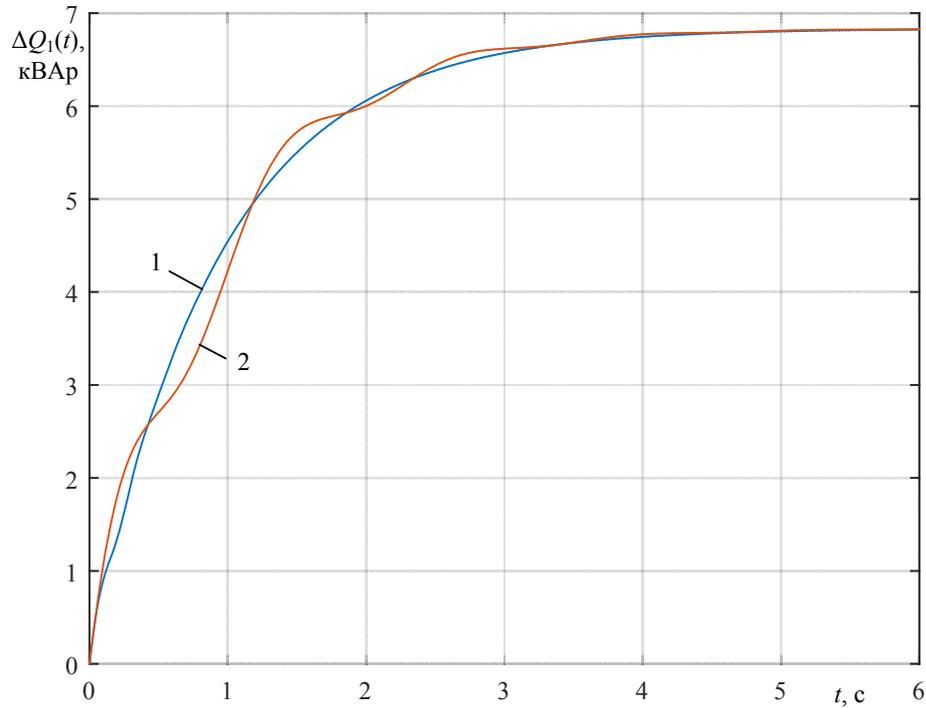


Рисунок 2.22 – Переходные характеристики  $\Delta Q_1(t)$  по управляющему воздействию  $\Delta U_f(t) = 0,1$  В: 1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

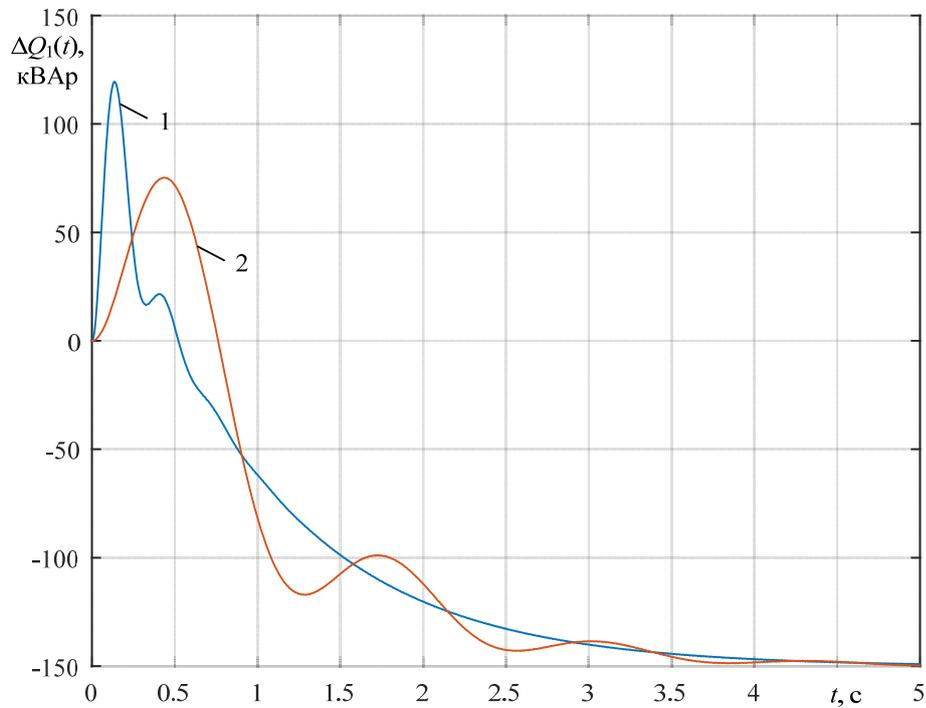


Рисунок 2.23 – Переходные характеристики  $\Delta Q_1(t)$  по возмущающему воздействию  $\Delta m(t) = 0,1$ :  
1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; б) –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

Переходные характеристики  $\Delta Q_1(t)$  по возмущающему воздействию – изменению напряжения узла нагрузки на  $\Delta U_2 = 600$  В и  $\Delta Q_1(t)$  при  $\Delta U_2(t) = 600(1 - e^{-t/0,05})$  В при различных значениях  $T_1$  и  $\varepsilon_1$  и работе двигателя в номинальном режиме с опережающим углом  $\varphi_1$  ( $\cos \varphi_1 = 0,9$ ) представлены на рисунках 2.24, 2.25.

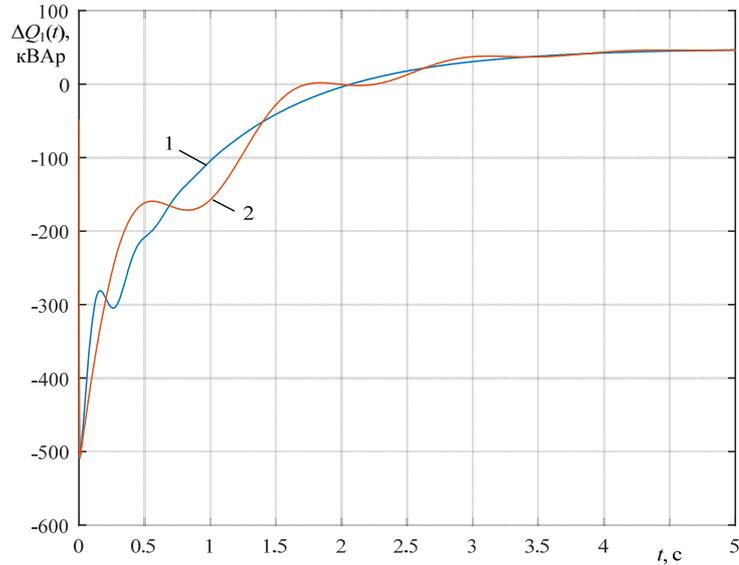


Рисунок 2.24 – Переходные характеристики  $\Delta Q_1(t)$  по возмущающему воздействию  $\Delta U_2 = 600$  В,  $k_3 = -0,078$ ,  $k_{1i} = 0,75$ : 1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

Аналогичные переходные характеристики двигателя при работе с отстающим углом  $\varphi_3$  ( $\cos \varphi_3 = -0,9$ ) – на рисунке 2.25.

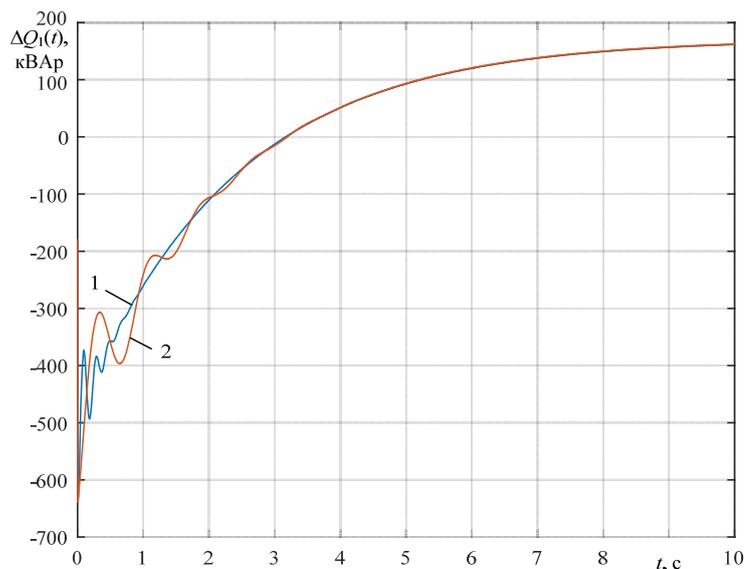


Рисунок 2.25 – Переходные характеристики  $\Delta Q_1(t)$  по возмущающему воздействию  $\Delta U_2 = 600$  В,  $k_3 = -0,28$ ,  $k_{1i} = 2,45$ : 1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

Из анализа переходных характеристик (рисунки 2.24 – 2.25) следует, что в установившемся режиме при уменьшении напряжения в сети на 10% реактивная мощность в номинальном режиме (опережающий  $\cos \varphi_1 = 0,9$ ) уменьшается на 7,9%, а при работе двигателя с отстающим углом ( $\cos \varphi_3 = 0,9$ ) – уменьшается на 25%.

## 2.2 Математическая модель обобщенной СЭС с учетом неустойчивости напряжения в сети

Известно [12, 36, 89], что реактивная мощность намагничивания асинхронного двигателя пропорциональна квадрату напряжения, а реактивная мощность рассеяния обратно пропорциональна квадрату напряжения, поэтому зависимость полной реактивной мощности от изменения напряжения можно представить в следующем виде [36]

$$q(U_*) = 0,65U_*^2 + 0,35U_*^{-2}.$$

Отклонение реактивной мощности от номинального значения в процентном выражении

$$\Delta q(U_*) = (1 - 0,65U_*^2 - 0,35U_*^{-2})100\%$$

представлено графиком на рисунке 2.30.

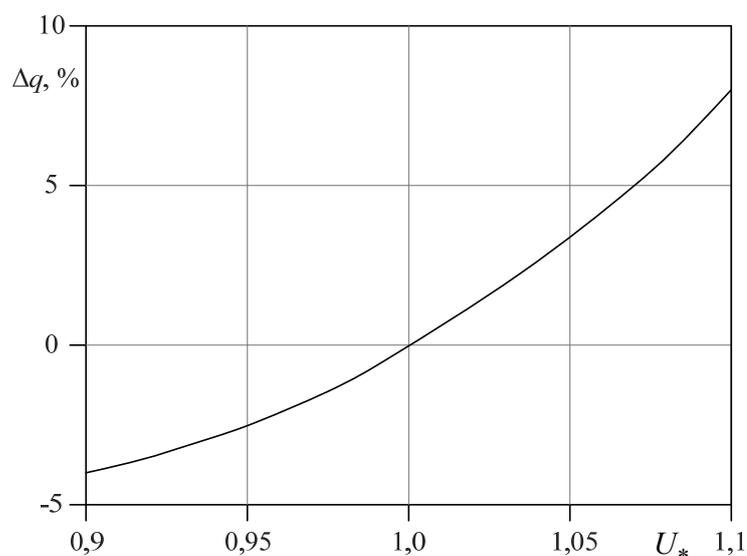


Рисунок 2.30 – Зависимость отклонения реактивной мощности асинхронного двигателя от напряжения сети

Если асинхронных электродвигателей большое число и при том разной мощности, то в этом случае зависимость реактивной мощности такой нагрузки от напряжения представлено [36] следующим выражением

$$Q_2 = \left( A_0 + A_1 \frac{U_2}{U_{02}} + A_2 \left( \frac{U_2}{U_{02}} \right)^2 \right) Q_{02}, \quad (2.20)$$

Где  $U_{02}$ ,  $Q_{02}$  – установившееся значение напряжения и реактивной мощности равные номинальным значениям.

Средние значения коэффициентов полинома для асинхронных двигателей серии А равны следующим величинам:

$$A_0 = 6,4; A_1 = -13,8; A_2 = 8,3 \text{ при } P_n \leq 20 \text{ кВт};$$

$$A_0 = 9,3; A_1 = -18,7; A_2 = 10,5 \text{ при } P_n > 20 \text{ кВт}.$$

Уравнение (2.20) в приращениях

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_2' + \Delta Q_2'', \quad (2.21)$$

где  $\Delta Q_2' = k_7 \Delta U_2$ ;  $k_7 = \frac{(A_1 + 2A_2)Q_{02}}{U_{02}}$ ;  $Q_{02} = \sum_{i=1}^m Q_{2i}$ ;  $\Delta Q_2'' = Q_{2i}$ ;  $m$  – число асин-

хронных двигателей.

Для узла нагрузки с шестью асинхронными электродвигателями суммарной номинальной мощностью  $P_{1н} = 3000$  кВт,  $\cos \varphi_n = 0,85$ ,  $U_n = 6000$  В коэффициент  $k_7 = 0,731$  кА.

Мощность конденсаторной установки при нестабильном напряжении питания составляет

$$Q_3 = \left( \frac{U_2}{U_{02}} \right)^2 Q_{03}.$$

Приращение реактивной мощности установки при изменении емкости батареи и напряжения питания

$$\Delta Q_3 = \Delta Q_3' + \Delta Q_3'', \quad (2.22)$$

где  $\Delta Q_3' = k_8 \Delta U_2$ ;  $k_8 = \frac{2Q_{03}}{U_{02}}$ ;  $Q_{03} = \sum_{j=1}^n Q_{3j}$ ;  $\Delta Q_3'' = Q_{3j}$ ;  $n$  – число секций кон-

денсаторной установки.

Уравнение напряжений линии питания имеет вид [64]:

$$U_2^2 = U_1 U_2 - P(R_{\text{л}} + R_{\text{т}}) - Q(x_{\text{л}} + x_{\text{т}});$$

$$U_1 = \frac{U_1'}{n},$$

где  $U_1, U_2$  – напряжения в начале и конце линии питания;  $R_{\text{л}}, R_{\text{т}}, x_{\text{л}}, x_{\text{т}}$  – активное и индуктивное сопротивления ЛЭП и трансформаторов, приведенные к напряжению  $U_2$ ;  $P, Q$  – активная и реактивная мощности, протекаемые по линии;  $U_1'$  – напряжение первичных обмоток трансформатора  $T_1$ ;  $n$  – коэффициент трансформации трансформатора  $T_1$ .

Приращение напряжения  $\Delta U_2$  составляет

$$\Delta U_2 = k_{10} \Delta Q + k_9 \Delta P + \Delta U_1 k_{11}. \quad (2.23)$$

Коэффициенты передачи линии электропередачи по каналам передачи воздействий от приращений реактивной и активной мощностей, а также приращения напряжения в начале линии к приращению напряжения в конце линии составляют:

$$k_9 = -\frac{R_{\text{л}} + R_{\text{т}}}{2U_{02} - U_{01}}; k_{10} = -\frac{x_{\text{л}} + x_{\text{т}}}{2U_{02} - U_{01}}; k_{11} = -\frac{U_{02}}{2U_{02} - U_{01}}.$$

Приращение активной и реактивной мощности линии электропередачи составляет:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2; \quad (2.24)$$

$$\Delta Q = \pm \Delta Q_1 - \Delta Q_2 + \Delta Q_3, \quad (2.25)$$

где знак « $\pm$ » перед  $\Delta Q_1$  соответствует работе синхронного двигателя в режиме потребления реактивной мощности.

Из формулы коэффициента реактивной мощности узла нагрузки (КРМ УН)

$$\operatorname{tg} \varphi = Q/P$$

получено выражение для его приращения

$$\Delta \operatorname{tg} \varphi = k_{12} \Delta Q - k_{13} \Delta P, \quad (2.26)$$

где  $k_{12} = \frac{1}{P_0}$ ;  $k_{13} = \frac{Q_0}{P_0^2}$ ;  $P_0, Q_0$  – установившиеся значения активной и реактивной мощностей узла нагрузки.

Структурная схема СЭС, построенная на основе схемы синхронного двигателя с добавлением элементов (2.21)-(2.26), представлена на рисунке 2.26а, на котором напряжение  $\Delta U_{2к}$  – падение напряжения, вызванное короткими замыканиями на стороне потребителей электроэнергии.

Упрощенная структурная схема СЭС представлена на рисунке 2.26б.

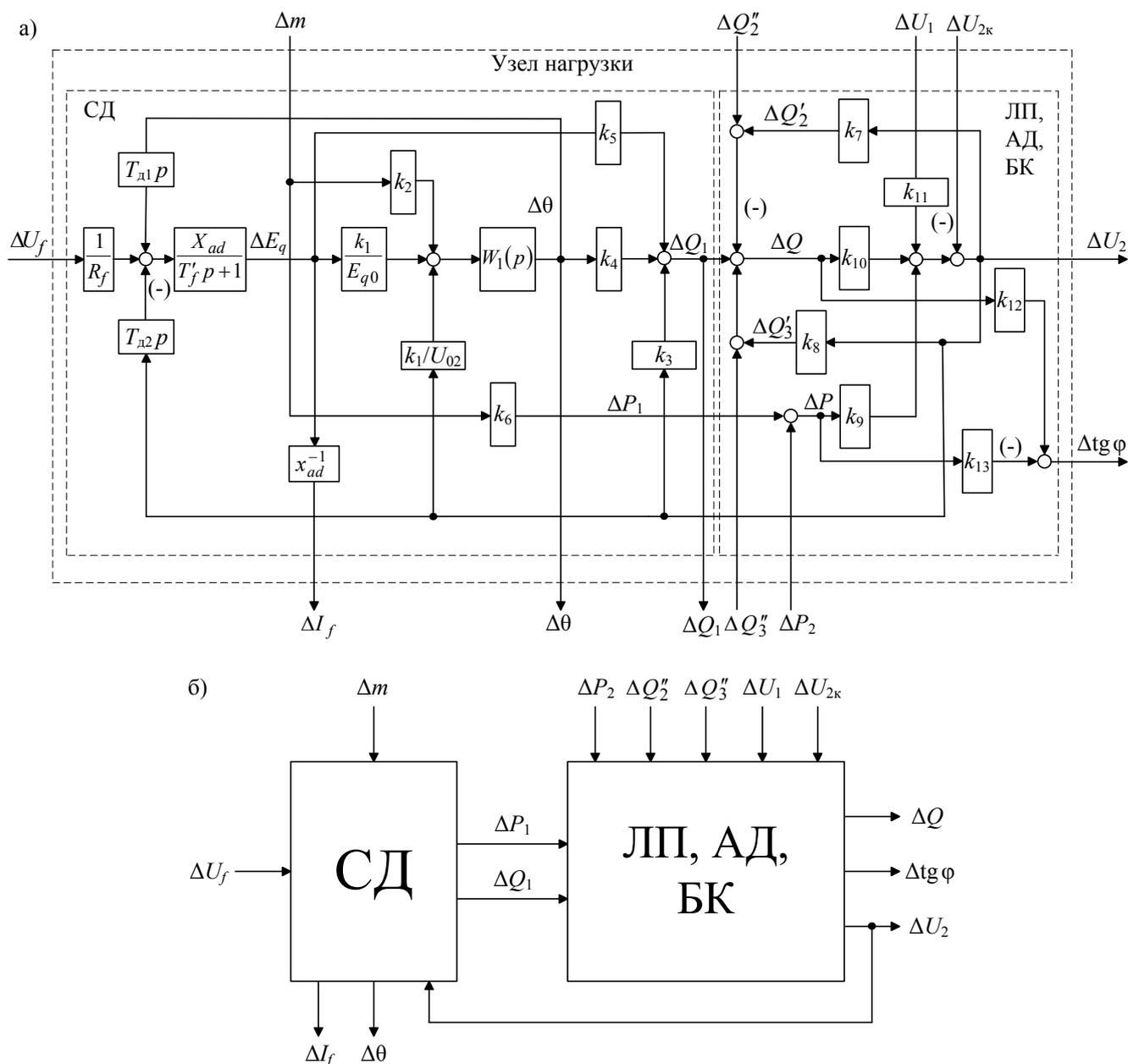


Рисунок 2.26а – Структурная схема СЭС: 1) полная; 2) упрощенная

Значения параметров элементов структурной схемы составляют:  $R_f = 0,18$  Ом;  $X_{ad} = 52$  Ом;  $T'_f = 0,367$  с;  $U_{02} = 6300$  В;  $T_{д1} = 162$  А·с;  $T_{д2} = 0,034$  с/Ом, а значения оставшихся параметров, зависящих от его режима работы, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Режим СД	Параметры СД							
	$\theta, ^\circ$	$E_q, \text{В}$	$k_1$	$k_2$	$k_3, \text{кА}$	$k_4, \text{кВА}$	$k_5, \text{кА}$	$k_6, \text{кВА}$
$Q_1 = Q_{1н}$	36,8	11800	-0,75	1,25	-0,078	-1297	0,147	2074
$Q_1 = 0$	50	9300	-1,19	1,55	-0,18	-1307	0,118	1628
$Q_1 = Q_{ср}$	43,4	10550	-0,97	1,4	-0,133	-1302	0,132	1851

Значения параметров остальных элементов СЭС МСП и СЭС КНС приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Значения параметров	Параметры				
	$k_7, \text{кА}$	$k_8, \text{кА}$	$k_9, \text{кА}^{-1}$	$k_{10}, \text{кА}^{-1}$	$k_{11}$
СЭС МСП	0,713	0,053	-(0,08÷0,075)	-(0,138÷0,254)	1,4÷1,2
СЭС КНС	0,26	0÷0,1	-0,014	-(0,163÷0,242)	1,04

Определение мощности  $\Delta P_2$ ,  $\Delta Q_2$  асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в переходных режимах представляет известные трудности, так как основные параметры схемы замещения для большинства электродвигателей неизвестны, но их можно определить по паспортным данным или экспериментально.

### 2.3 Методика определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным

При проектировании и исследовании асинхронных электроприводов очень часто используются механические и рабочие характеристики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, которые необходимы для решения ряда задач: для выбора уставок различного ряда расчетных устройств в схемах защит от многофазных замыканий и замыканий на землю; для расчета пусковых токов при выборе коммутирующих аппаратов; при расчете продолжительности разгона и ускорения электродвигателей; моделировании переходных режимов и т.д.

Эти характеристики могут быть построены на основе схем замещения [34, 46, 62, 89], в состав которых входят неизвестные значения активных сопротивлений  $R_1$ ,  $R_\mu$  и индуктивных сопротивлений  $x_1$ ,  $x_\mu$  статора и ветви намагничивания, а также приведенные к цепи статора активное  $R_2$  и индуктивное  $x_2$  сопротивления ротора.

Сопротивления  $R_2$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  не остаются постоянными при изменении скольжения  $s$ . При скольжении свыше номинального значения  $s_H$  из-за насыщения зубцового слоя [34, 46, 89] уменьшаются сопротивления  $x_1$ ,  $x_2$ , а при увеличении скольжения свыше критической величины  $s_K$ , из-за проявления эффекта вытеснения тока в проводниках обмотки ротора, происходит увеличение сопротивления  $R_2$  и уменьшение  $x_2$ .

Параметры схемы замещения могут быть определены экспериментально [34, 89] или расчетным методом. Второй метод более универсален, так как в условиях выполнения проектных работ постановка экспериментов во многих случаях затруднена. А при наличии такой возможности, например, на промышленных предприятиях – при наличии большого парка машин – расходы на проведение экспериментальных работ могут составить значительную величину.

Поэтому аналитическому методу расчета посвящено достаточно много работ [24, 37, 47, 68, 75, 82, 89, 107-110, 119, 120], из числа которых отдельно можно выделить итерационные методы [24, 37, 47], но они сложны для практического применения. Вторая часть работ [24, 68, 75] посвящена разработке сравнительно простых методик определения параметров схем замещения, суть которых, в конечном итоге, состоит в необходимости решения системы двух алгебраических уравнений с тремя неизвестными. Для решения этой системы ее сводят к системе двух уравнений с двумя неизвестными за счет предварительного выбора коэффициента

$$\beta = \frac{R_1}{R_2}.$$

К сожалению, в этих работах нет обоснования выбора коэффициента  $\beta$ , а если принять его равным среднему значению из  $\beta = 0,6 \dots 2,5$ , то при удачном выборе погрешность будет иметь малую величину, а в остальных случаях – недопустимо большую.

Значительный интерес представляет работа [82], но отсутствие в ней вычислительного алгоритма решения предложенной нелинейной системы алгебраических уравнений затрудняет использование этой методики в инженерной практике.

Большое внимание этой проблеме уделяется в зарубежной литературе [108-111, 120, 121].

В данной работе [48, 52] предлагается достаточно простая и сравнительно точная методика расчета параметров элементов схемы замещения (рисунок 2.27) асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

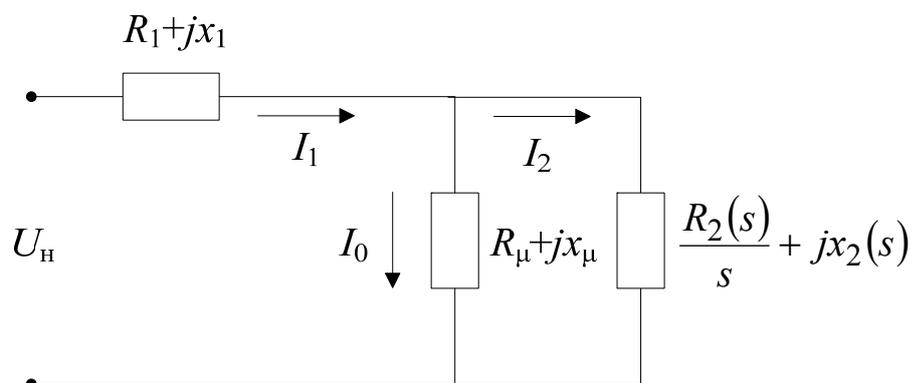


Рисунок 2.27 – Схема замещения асинхронного двигателя

Зависимость сопротивлений  $R_2(s)$  и  $x_1(s)$ ,  $x_2(s)$  от скольжения объясняется тем, что при скольжении свыше критической величины  $s = s_k$  начинает проявляться насыщение зубцового слоя и эффект вытеснения роторного тока, влекущее за собой уменьшение индуктивных сопротивлений  $x_1(s)$ ,  $x_2(s)$  и увеличение активного сопротивления  $R_2(s)$ .

Изменение активного сопротивления цепи ротора асинхронного двигателя с достаточной точностью можно отразить следующей зависимостью [17, 89]:

$$R_2(s) = \begin{cases} R_2(s_k), & \forall 0 \leq s \leq s_k; \\ R_2(0) + (R_2(1) - R_2(0))\sqrt{s}, & \forall s_k \leq s \leq 1, \end{cases} \quad (2.27)$$

где

$$R_2(0) = \frac{R_2(s_H) - R_2(1)\sqrt{s_k}}{1 - \sqrt{s_k}}.$$

Индуктивное сопротивление двигателя незначительно изменяется при изменении скольжения от  $s = 1$  до  $s = 0,25$  [89]. Основное изменение индуктивного

сопротивления происходит при изменении скольжения от  $s = 0,25$  до  $s = 0$ . Поэтому изменение реактивного сопротивления двигателя с допустимой погрешностью [89] можно характеризовать следующей зависимостью:

$$x_k(s) = \begin{cases} x_k(s_H), \forall 0 \leq s \leq s_K; \\ x_k(s_H) - \frac{x_k(s_H) - x_k(1)}{0,25 - s_K} (s - s_K), \forall s_K \leq s \leq 0,25; \\ x_k(1), \forall 0,25 \leq s \leq 1. \end{cases} \quad (2.28)$$

Из схемы замещения следует, что комплексное сопротивление

$$Z(s) = R(s) + jx(s) = R_1 + jx_1(s) + \frac{(R_\mu + jx_\mu) \left( \frac{R_2(s)}{s} + jx_2(s) \right)}{R_\mu + \frac{R_2(s)}{s} + j(x_\mu + x_2(s))} \quad (2.29)$$

является функцией скольжения, после преобразования которого получены выражения для активного сопротивления

$$R(s) = R_1 + \frac{R_2(s)x_\mu}{sA(s)} \quad (2.30)$$

и индуктивного сопротивления двигателя

$$x(s) = x_1 + \frac{x_2(s)x_\mu^2 + x_\mu \left( \frac{R_2^2(s)}{s^2} + x_2^2(s) \right)}{A(s)}, \quad (2.31)$$

где

$$A(s) = (x_\mu + x_2(s))^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}.$$

Схема замещения дает также возможность получить выражения для электромагнитной мощности

$$P_{\text{э2}}(s) = \frac{U^2 \frac{R_2(s)}{s}}{\left( R_1 + \frac{R_2(s)}{s} \right)^2 + x_k^2(s)} \quad (2.32)$$

и реактивной мощности рассеяния, величина которой в номинальном режиме составляет

$$Q_2(s_H) = \frac{U^2 x_K(s_H)}{\left(R_1 + \frac{R_2(s_H)}{s_H}\right)^2 + x_K^2(s_H)}, \quad (2.33)$$

где  $U$  – линейное напряжение.

Величина номинальной мощности определена из [89], т.е.

$$Q_2(s_H) = \frac{P_H}{2b_H}, \quad (2.34)$$

где  $b_H$  – кратность полезного момента при критическом скольжении.

В [85] также показано, что кратность полезного момента

$$m(s) = \frac{M_\vartheta(s)}{M_{\vartheta H}} = \frac{P_\vartheta(s)}{P_{\vartheta H}}$$

составляет при критическом скольжении

$$\frac{M_\vartheta(s_K)}{M_{\vartheta H}} = \frac{P_\vartheta(s_K)}{P_{\vartheta H}} = b_H \quad (2.35)$$

и коротком замыкании

$$\frac{M_\vartheta(1)}{M_{\vartheta H}} = \frac{P_\vartheta(1)}{P_{\vartheta H}} = k_\Pi. \quad (2.36)$$

Номинальная электромагнитная мощность

$$P_{\vartheta H} = P_H + \Delta P_2 + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{д}}$$

состоит из номинальной мощности на валу  $P_H$ , потерь в меди ротора

$$\Delta P_2 \approx s_H P_{\vartheta H},$$

механических потерь

$$\Delta P_{\text{мех}} = (0,007 \div 0,015) P_H,$$

и добавочных потерь

$$\Delta P_{\text{д}} = 0,005 P_H.$$

Из совместного рассмотрения этих выражений электромагнитную мощность в номинальном режиме можно выразить через номинальную мощность на валу

$$P_{\vartheta H} = a_0 P_H, \quad (2.37)$$

где  $a_0 = \frac{1,02}{1 - s_H}$ .

Номинальные сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $x_K$  (вместо  $R_2(s_H)$ ,  $x_K(s_H)$ ) определяются из решения системы трех уравнений, первые два из которых получены из (2.32) при  $U = U_H$ ,  $s = s_H$

$$R_1^2 + \frac{R_2^2}{s_H^2} - \frac{a_1}{s_H} R_2 + \frac{2}{s_H} R_1 R_2 + x_K^2 = 0 \quad (2.38)$$

и  $s = s_K$

$$R_1 = a_2 - a_3 x_K^2, \quad (2.39)$$

где

$$a_1 = \frac{U_H^2}{P_{ЭН}}, \quad a_2 = \frac{a_1}{4b_H}, \quad a_3 = \frac{b_H}{a_1}.$$

А третье уравнение

$$R_2 = a_4 x_K, \quad (2.40)$$

где

$$a_4 = 2a_0 s_H b_H$$

получено в результате деления (2.32) на (2.33).

В результате подстановки (2.39) и (2.40) в (2.38) получено уравнение

$$\sum_{j=0}^4 c_j x_K^j = 0, \quad (2.41)$$

где

$$c_0 = \left(\frac{a_2}{a_3}\right)^2; \quad c_1 = \frac{(2a_2 - a_1)a_4}{s_H a_3^2}; \quad c_2 = \frac{1 - 2a_2 a_3 + a_4^2 s_H^{-2}}{a_3^2}; \quad c_3 = -\frac{2a_4}{a_3 s_H}; \quad c_4 = 1,$$

из решения которого определяется  $x_K$ , а сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  – из (2.39) и (2.40).

С целью упрощения нахождения полезного корня уравнения (2.41) удобно его в первом приближении определять из выражения

$$x_K^{(1)} = \frac{a_1 a_4 s_H}{a_4^2 + s_H^2},$$

полученного в результате подстановки (2.40) в (2.38) при  $R_1 = 0$ . Затем эта величина уточняется по уравнению (2.41).

Индуктивные сопротивления статора и ротора составляют

$$x_1 = 0,42x_k;$$

$$x_2 = 0,58x_k.$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания определяется из выражения

$$x_\mu = \frac{U_H^2}{Q_\mu} - x_1, \quad (2.42)$$

а реактивная мощность этой ветви –

$$Q_\mu = \frac{P_H}{\eta_H} \operatorname{tg} \varphi_H - Q_{2H}.$$

Сопротивления при коротком замыкании двигателя ( $s = 1$ )

$$R_2(1) = \frac{k_\Pi P_{\text{ЭН}}}{3k_i^2 I_H^2}, \quad (2.43)$$

$$x_k(1) = \sqrt{\frac{U_H^2}{k_\Pi P_{\text{ЭН}}} R_2(1) - (R_1 + R_2(1))^2}$$

получены из совместного рассмотрения уравнений электромагнитной мощности

$$k_\Pi P_{\text{ЭН}} = \frac{U_H^2 R_2(1)}{(R_1 + R_2(1))^2 + x_k^2(1)}$$

и пускового тока

$$k_i I_H = \frac{U_H}{\sqrt{3} \sqrt{(R_1 + R_2(1))^2 + x_k^2(1)}}.$$

Блок-схема расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя представлена на рисунке 2.28, в которой реализована методика расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным [48, 52].

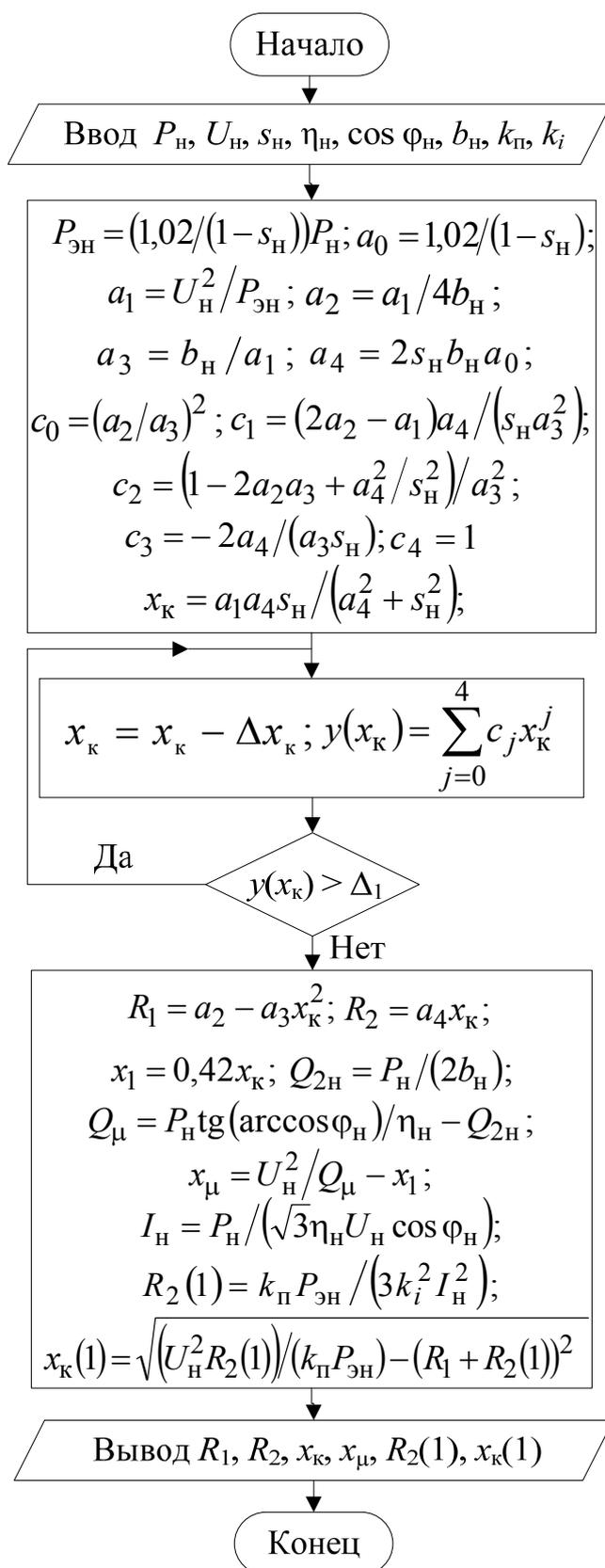


Рисунок 2.28 – Блок-схема алгоритма расчета сопротивлений двигателя

Результаты вычислений, контрольные значения параметров, взятые из соответствующих источников (с индексом «э»), с которыми сравниваются результаты расчетов и погрешность вычислений представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

№	Тип двигателя, паспортные данные	АД [1] $P_H = 55$ кВт; $U_H = 380$ В; $s_H = 0,018$ ; $\eta_H = 0,91$ ; $\cos \varphi_H = 0,92$ ; $b_H = 2,4$ ; $k_H = 1,16$ ; $k_i = 6,0$	АД [12] $P_H = 15$ кВт; $U_H = 660$ В; $s_H = 0,016$ ; $\eta_H = 0,89$ ; $\cos \varphi_H = 0,89$ ; $b_H = 2$	АД [4] $P_H = 250$ кВт; $U_H = 3000$ В; $s_H = 0,0246$ ; $\eta_H = 0,9$ ; $\cos \varphi_H = 0,89$ ; $b_H = 2,62$
	Параметры			
1	$R_{1э}, \text{ Ом}$	0,0572	1,1	0,7
2	$R_1, \text{ Ом}$	0,05648	1,059	0,689
3	$\delta_1, \%$	1,27	3,75	0,7
4	$R_{2э}, \text{ Ом}$	0,0418	0,383	0,795
5	$R_2, \text{ Ом}$	0,04188	0,38324	0,7874
6	$\delta_2, \%$	0,2	0,1	0,95
7	$x_{кэ}, \text{ Ом}$	0,4664	5,52	5,83
8	$x_k, \text{ Ом}$	0,468	5,72	5,85
9	$\delta_3, \%$	0,3	3,6	0,34
10	$x_{мэ}, \text{ Ом}$	10,5	85,2	95,6
11	$x_\mu, \text{ Ом}$	10,1	86,2	92,7
12	$\delta_4, \%$	3,8	1,9	3
13	$R_{2э}(1), \text{ Ом}$	0,0638	-	-
14	$R_2(1), \text{ Ом}$	0,0616	-	-
15	$\delta_5, \%$	3,36	-	-
16	$x_{кэ}(1), \text{ Ом}$	0,352	-	-
17	$x_k(1), \text{ Ом}$	0,346	-	-
18	$\delta_6, \%$	1,6	-	-
19	$\delta_{ср} = (\delta_{ср1} + \delta_{ср2} + \delta_{ср3})/3 = 1,9\%$	$\delta_{ср1} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \delta_{срi} = 2,1\%$	$\delta_{ср2} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \delta_{срi} = 2,3\%$	$\delta_{ср3} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \delta_{срi} = 1,25\%$

Сопоставление данных таблицы показывает, что погрешность вычисления параметров схемы замещения не превышает 4%, что в 2-3 раза ниже погрешности альтернативных методик [24, 68, 75].

Средняя величина погрешности предложенной методики (таблица 2.3) составляет  $\delta_{ср} = 1,9\%$ , что более чем в 3 раза меньше погрешности альтернативных методик: [24] – 7%, [75] – около 15%.

Разработанная методика позволяет понизить погрешность вычисления параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором как в номинальном режиме, так и в режиме короткого замыкания.

## 2.4 Методика расчета активной и реактивной мощности при разгоне асинхронного двигателя

Относительные значения активной  $p(s)$ , реактивную  $q(s)$  мощность и коэффициент реактивной мощности  $\operatorname{tg} \varphi(s)$  можно выразить через сопротивления (2.30), (2.31) и номинальное напряжение:

$$p(s) = \frac{P(s)}{P_H} = \frac{U_H^2 R(s)}{P_H (R^2(s) + x^2(s))}; \quad (2.44)$$

$$q(s) = \frac{Q(s)}{P_H} = \frac{U_H^2 x(s)}{P_H (R^2(s) + x^2(s))}; \quad (2.45)$$

$$\operatorname{tg} \varphi(s) = \frac{x(s)}{R(s)},$$

где  $P_H$  – номинальная мощность.

Для построения временных зависимостей этих величин необходимо иметь зависимость скольжения двигателя от времени, которую можно получить из эксперимента или из решения дифференциального уравнения [12]

$$\frac{ds}{dt} = \frac{2M_K s_K s}{\omega_0 J (s^2 + s_K^2)} = \frac{M_c}{J \omega_0}, \quad (2.46)$$

где  $M_K$  и  $s_K$  – критические значения момента и скольжения;  $M_c$  – момент сопротивления приводимого в движение механизма;  $J$  – момент инерции электродвигателя и производственного механизма.

Вычисление  $p(t)$  и  $q(t)$  производится в следующей последовательности:

- рассчитываются сопротивления  $R(s)$ ,  $x(s)$  по выражениям (2.30), (2.31) с учетом выражений (2.27), (2.28) и  $x_2(s) = 0,58x_K(s)$ ;
- относительные значения  $p(s)$ ,  $q(s)$  вычисляются по выражениям (2.44), (2.45);
- скольжение двигателя рассчитывается по уравнению (2.46);
- временные зависимости  $p(t)$ ,  $q(t)$  вычисляются по соотношениям (2.44)-(2.46).

Построение характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором марки 4А-225М2У3:  $U_H = 380$  В;  $P_H = 55$  кВт;  $s_H = 0,018$ ;  $s_K = 0,11$ ;

$R_1 = 0,0572 \text{ Ом}; R_2 = 0,0418 \text{ Ом}; x_k = 0,4664 \text{ Ом}; Z_H = 2,2 \text{ Ом}; x_\mu = 10,56 \text{ Ом};$   
 $\eta_H = 0,91; \cos \varphi_H = 0,92; J = 0,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; m_\Pi = 1,2; m_K = 2,5.$  Полная мощность СЭС  
 $S_0 = (2277+j1227) \text{ кВА}.$

Расчетные значения сопротивлений (2.30), (2.31) представлены в таблице 2.4 и на рисунке 2.29.

Таблица 2.4

$s$	$s_H$	$s_K$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$R_2(s), \text{ Ом}$	0,042		0,050	0,052	0,055	0,056	0,058	0,060	0,061	0,063	0,064
$x_1(s), \text{ Ом}$	0,196		0,148								
$x_2(s), \text{ Ом}$	0,271		0,204								
$R(s), \text{ Ом}$	2,168	0,998	0,297	0,225	0,188	0,166	0,150	0,139	0,131	0,124	0,119
$x(s), \text{ Ом}$	0,913	0,651	0,354	0,351	0,350	0,349	0,349	0,349	0,349	0,349	0,349

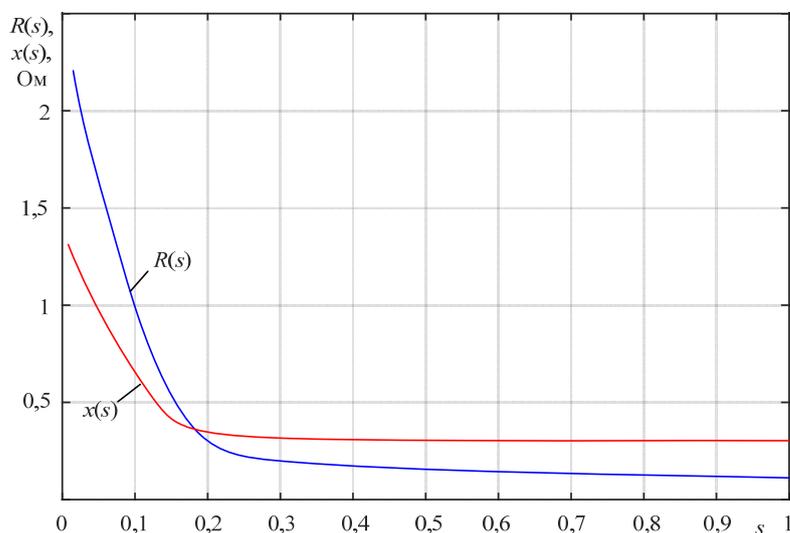


Рисунок 2.29 – Зависимость активного и реактивного сопротивления двигателя от скольжения: 1 –  $R(s)$ ; 2 –  $x(s)$

Относительные значения  $p(s)$ ,  $q(s)$  мощность и  $\text{tg } \varphi(s)$  представлены в таблице 2.5 и на рисунке 2.30.

Таблица 2.5

$s$	$s_H$	$s_K$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$P(s), \text{ кВт}$	56,27	210,1	201	187	172,3	160,1	150,4	142,5	136,2	130,8	126,4
$p(s)$	1,03	3,82	3,65	3,4	3,13	2,91	2,73	2,59	2,48	2,38	2,3
$Q(s), \text{ кВАр}$	23,82	138,1	239,8	291,7	320,1	337,5	349	357,1	363,1	367,7	371,3
$q(s)$	0,43	2,51	4,36	5,3	5,82	6,14	6,35	6,49	6,6	6,69	6,75
$\text{tg } \varphi(s)$	0,01	0,061	0,105	0,128	0,141	0,148	0,153	0,157	0,159	0,161	0,165

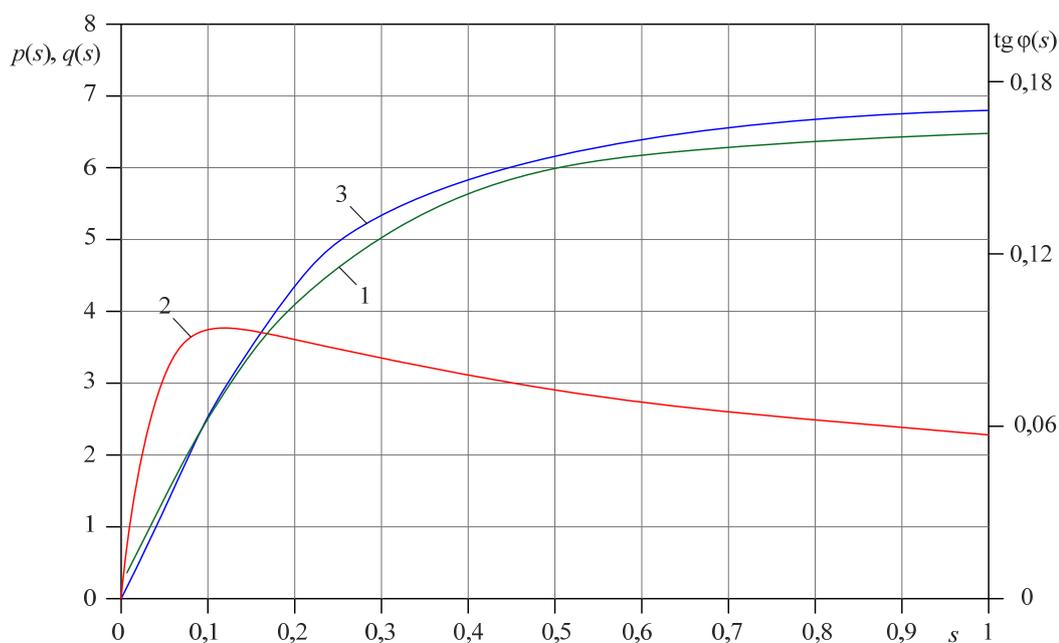


Рисунок 2.30 – Зависимость коэффициента мощности и относительных значений активной и реактивной мощности от скольжения: 1 –  $\text{tg } \varphi(s)$ ; 2 –  $p(s)$ , 3 –  $q(s)$

Временная характеристика  $s(t)$  (рисунок 2.31) при разгоне двигателя 4А-225М2У3 построена по уравнению (2.46).

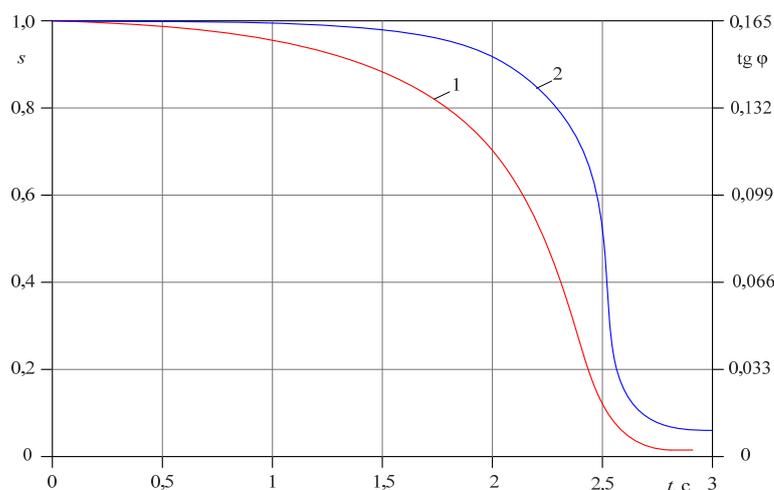


Рисунок 2.31 – Временные зависимости скольжения и РМ при пуске АД: 1 –  $s(t)$ ; 2 –  $\text{tg } \varphi(t)$

Временные характеристики  $p_1(t)$ ,  $q_1(t)$ , построенные по характеристикам, указанным на рисунках 2.30, 2.31, представлены в таблице 2.6 и на рисунке 2.32.

Таблица 2.6

$t, c$	0	0,5	1	1,5	2	2,25	2,5
$s$	1	0,98	0,94	0,86	0,66	0,47	0,15
$p_1(t)$	2,3	2,32	2,36	2,32	2,65	2,98	3,7
$q_1(t)$	6,75	6,73	6,71	6,64	6,42	6,04	4,0

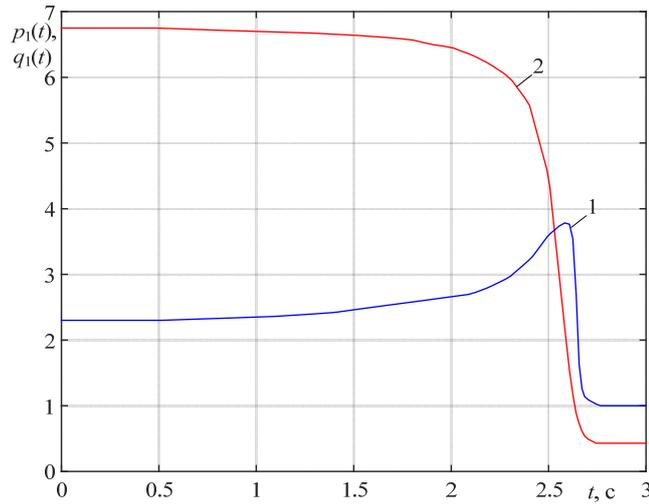


Рисунок 2.32 – Пусковые характеристики двигателя, реализованные в среде имитационного моделирования MATLAB Simulink: 1 –  $p_1(t)$ ; 2 –  $q_1(t)$

Аналогичные характеристики  $p_2(t)$  и  $q_2(t)$ , построенные для этого двигателя, но с учетом электромагнитных процессов по методике [105], представлены на рисунке 2.33.

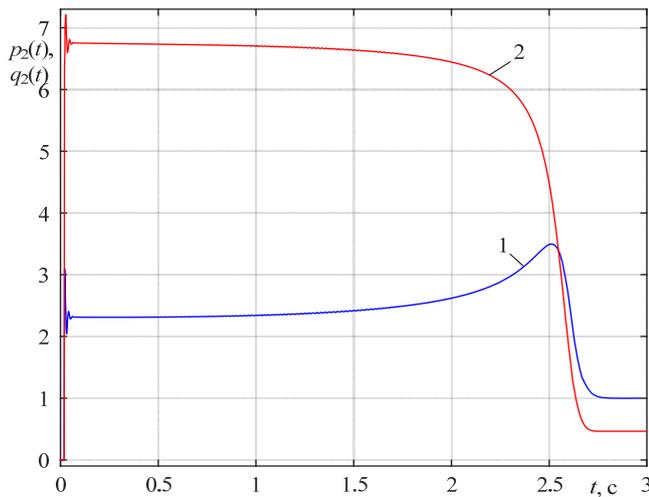


Рисунок 2.33 – Пусковые характеристики двигателя: 1 –  $p_2(t)$ ; 2 –  $q_2(t)$

Максимальная погрешность характеристик  $p_1(t)$ ,  $q_1(t)$  по сравнению с  $p_2(t)$ ,  $q_2(t)$  в течение первых трех периодов напряжения в сети ( $\Delta t_1 = 0,06$  с) составляет  $\delta_1 = 6,7\%$ .

Усредненная величина погрешности на участке равном времени разгона двигателя  $t_1 = 2,7$  с без учета электромагнитных процессов составляет:

$$\delta_1 = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{p_1(t_i) - p_2(t_i)}{p_1(t_i)} = 3,9\%; \quad \delta_2 = \frac{100\%}{m} \sum_{j=1}^m \frac{q_1(t_j) - q_2(t_j)}{q_1(t_j)} = 3,6\%.$$

## 2.5 Переходные характеристики коэффициента РМ и напряжения в узле нагрузки

Переходные характеристики объекта управления для выходных величин – «отклонение коэффициента реактивной мощности узла нагрузки  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$ » и «отклонение напряжения узла нагрузки  $\Delta U_2(t)$ » при воздействиях  $\Delta U_f(t) = 10 \text{ В}$ ,  $\Delta m(t) = 0,5$  и  $\Delta U_k(t) = 0,2U_{02}(t)$  для двух вариантов объекта представлены соответственно на рисунках 2.34-2.36.

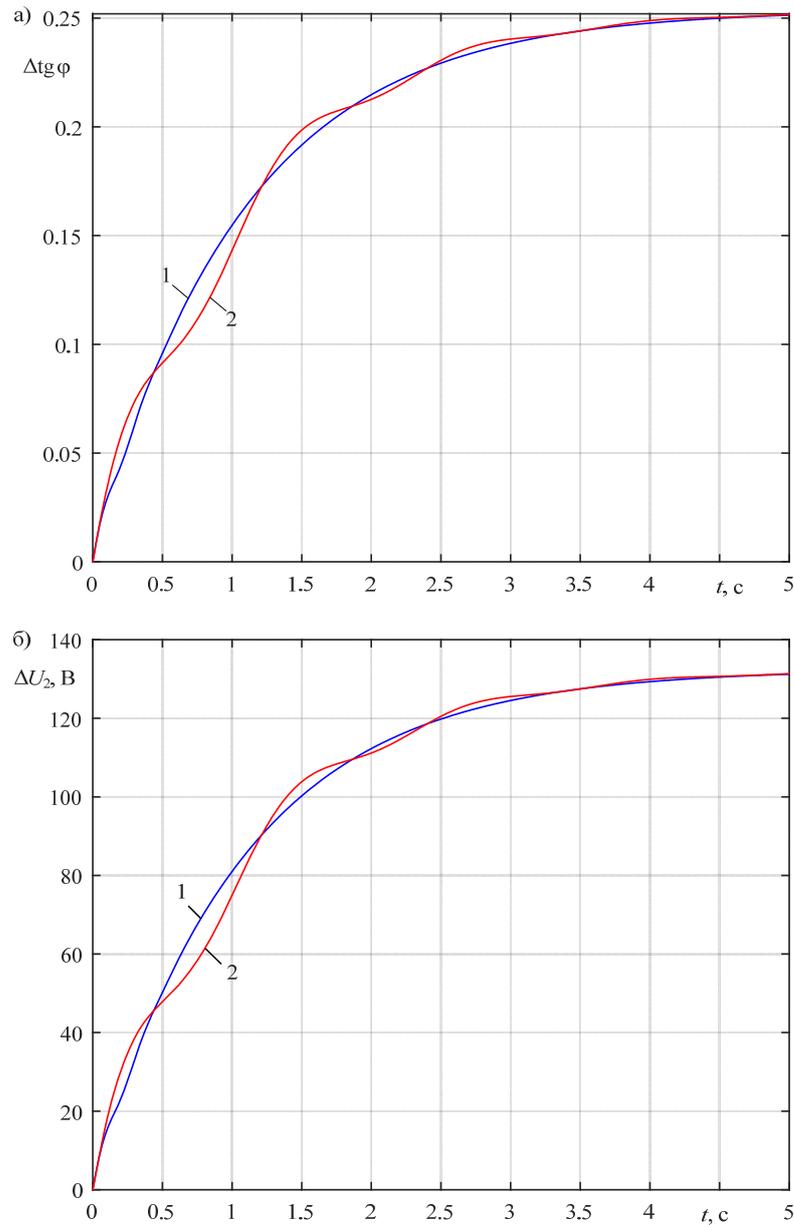


Рисунок 2.34 – Переходные характеристики  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  (а) и  $\Delta U_2(t)$  (б) по управляющему воздействию  $\Delta U_f(t) = 10 \text{ В}$ ,  $k_3 = -0,078$ ,  $k_1 = 0,75$ : 1 –  $T_1 = 0,075 \text{ с}$ ,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31 \text{ с}$ ,  $\varepsilon_1 = 0,097$

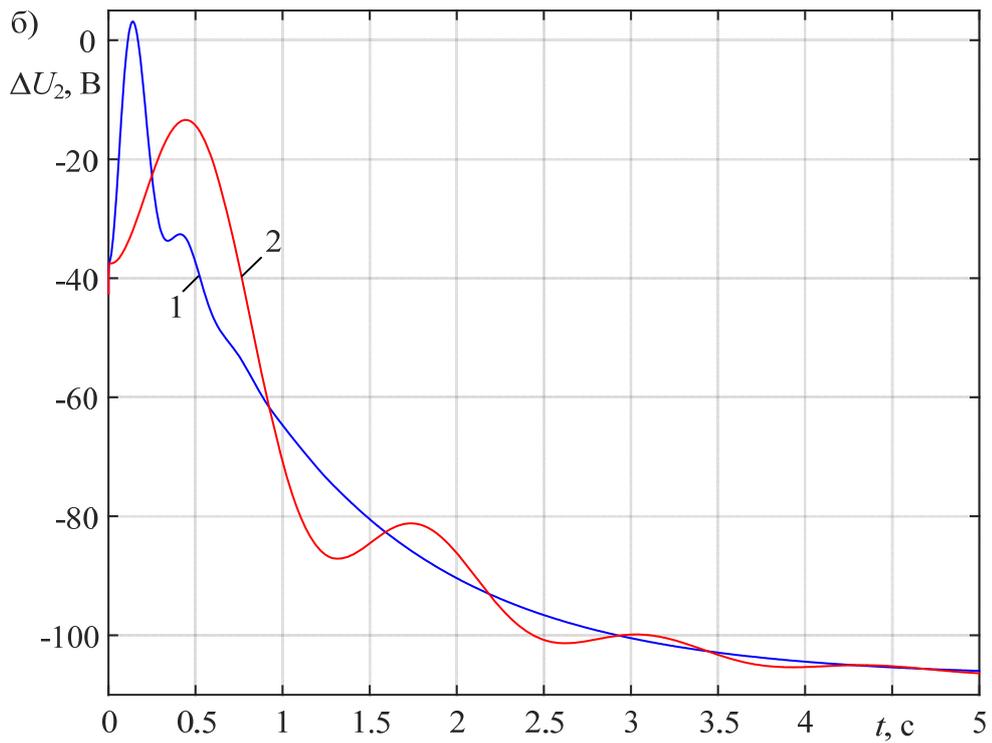
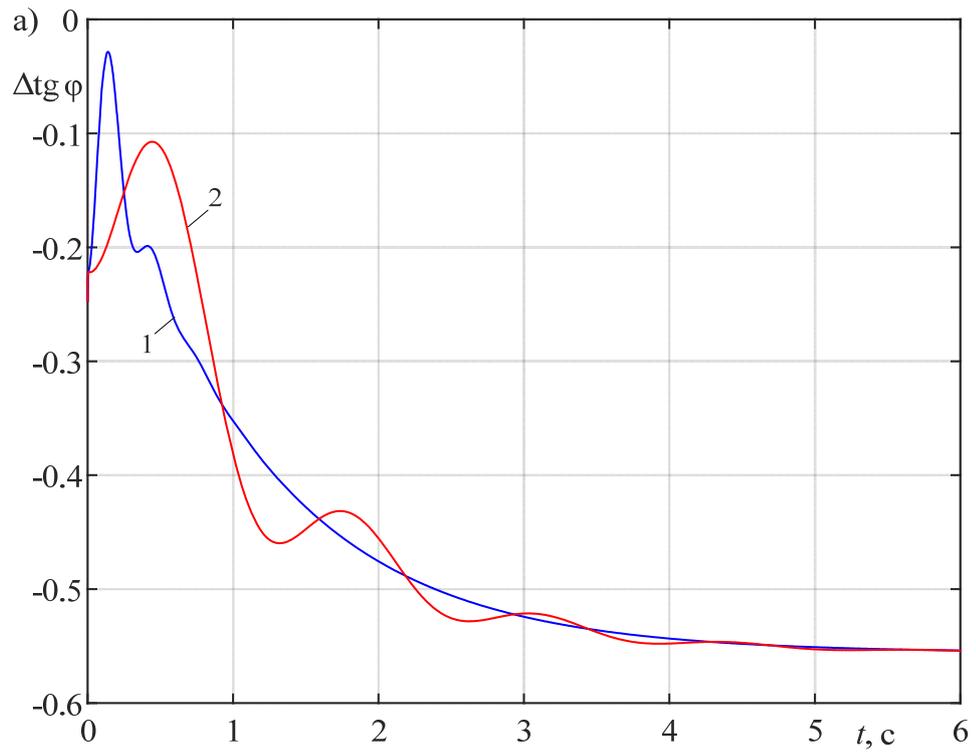


Рисунок 2.35 – Переходные характеристики  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  (а) и  $\Delta U_2(t)$  (б) по возмущающему воздействию  $\Delta m(t) = 0,5$ ,  $k_3 = -0,078$ ,  $k_1 = 0,75$ : 1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

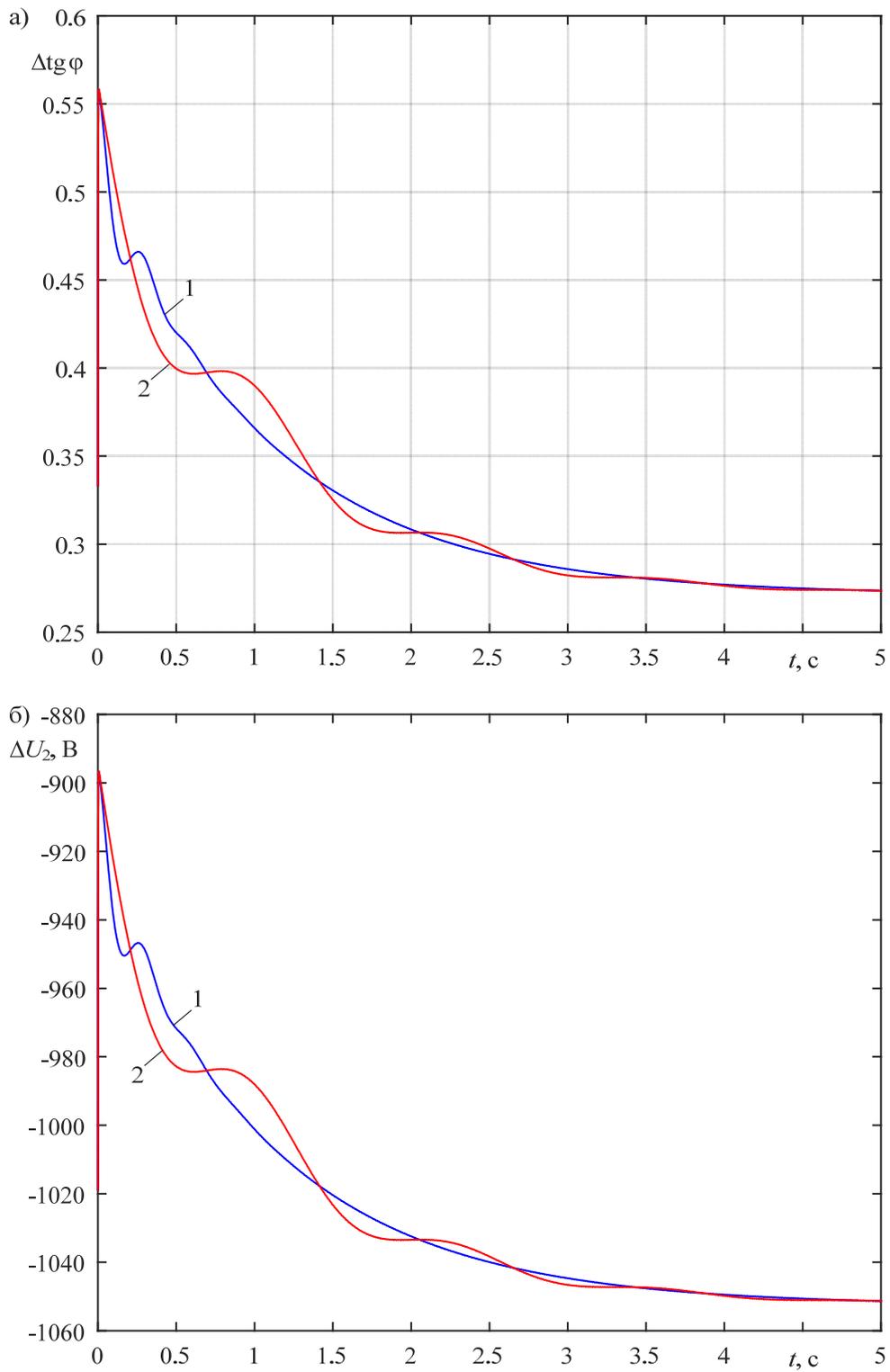


Рисунок 2.36 – Переходные характеристики  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  (а) и  $\Delta U_2(t)$  (б) при коротком замыкании на линии  $\Delta U_K(t) = 0,2U_{02}(t)$ ,  $k_3 = -0,078$ ,  $k_1 = 0,75$ : 1 –  $T_1 = 0,075$  с,  $\varepsilon_1 = 0,38$ ; 2 –  $T_1 = 0,31$  с,  $\varepsilon_1 = 0,097$

Как следует из анализа этих характеристик, при изменении задающего воздействия – увеличении напряжения возбуждения на  $\Delta U_f = 10$  В (реактивная мощность изменяется на  $\Delta Q_1 = 700$  кВАр) напряжение в узле нагрузки увеличивается на 132 В в первом варианте по апериодическому закону, а во втором варианте по колебательной зависимости. Падение напряжения в узле нагрузки при уменьшении напряжения в линии на  $0,2U_{02}$  при коротком замыкании составляет 998 В и характеристики имеют тот же характер, что и при изменении задающего воздействия, а величина  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  вначале резко уменьшается до  $\Delta \text{tg } \varphi(0) = -0,5$ , а затем растет до  $\Delta \text{tg } \varphi(\infty) = -0,18$ .

При набросе нагрузки на  $\Delta m(t) = 0,5$  (относительно  $\Delta P = 0,5P_{эм}$ ) провал напряжения достигает  $\Delta U_2 = -106,9$  В, а КРМ УН вначале ступенчато уменьшается до  $\Delta \text{tg } \varphi(0) = -0,22$ , а затем продолжает падать до  $\Delta \text{tg } \varphi(\infty) = -0,665$ . Процесс во втором варианте склонен к большей колебательности.

## 2.6 Динамические характеристики СЭС с учетом влияния обратной связи по напряжению

Схема реализации объекта управления (рисунок 2.26) в Matlab-Simulink представлена на рисунке 2.37, в которой обратная связь по напряжению  $\Delta U_2$  реализуется при замкнутом ключе  $K8$ .

Влияние параметров элементов узла нагрузки на его динамику оценивается по переходным характеристикам объекта управления без обратной связи ( $K8$  разомкнут) и с обратной связью ( $K8$  замкнут).



На рисунке 2.38 представлены переходные характеристики  $\Delta\theta(t)$  и  $\Delta\text{tg } \varphi(t)$  по управляющему воздействию  $\Delta U_f(t) = 0,1(t)$  В, полученные при замкнутом ключе  $K8$  (кривая 1) и разомкнутом ключе  $K8$  (кривая 2).

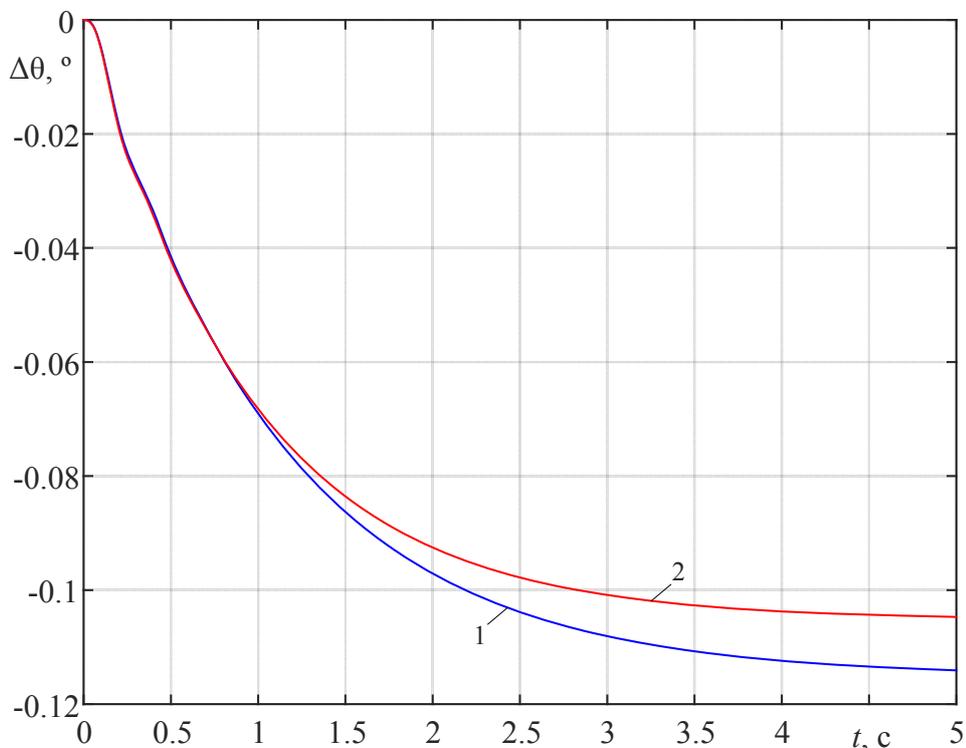


Рисунок 2.38 – Переходные характеристики объекта управления  $\Delta\theta(t)$  при  $\Delta U_f(t) = 0,1$  В:

1 – ключ  $K8$  замкнут; 2 – ключ  $K8$  разомкнут

На рисунке 2.39 представлены временные характеристики коэффициента реактивной мощности  $\Delta\text{tg } \varphi(t)$  (а) и напряжения  $\Delta U_2(t)$  (б) узла нагрузки при пуске асинхронного двигателя 4А225М2 УЗ с обратной связью (кривая 1) и без обратной связи (кривая 2) по напряжению питания.

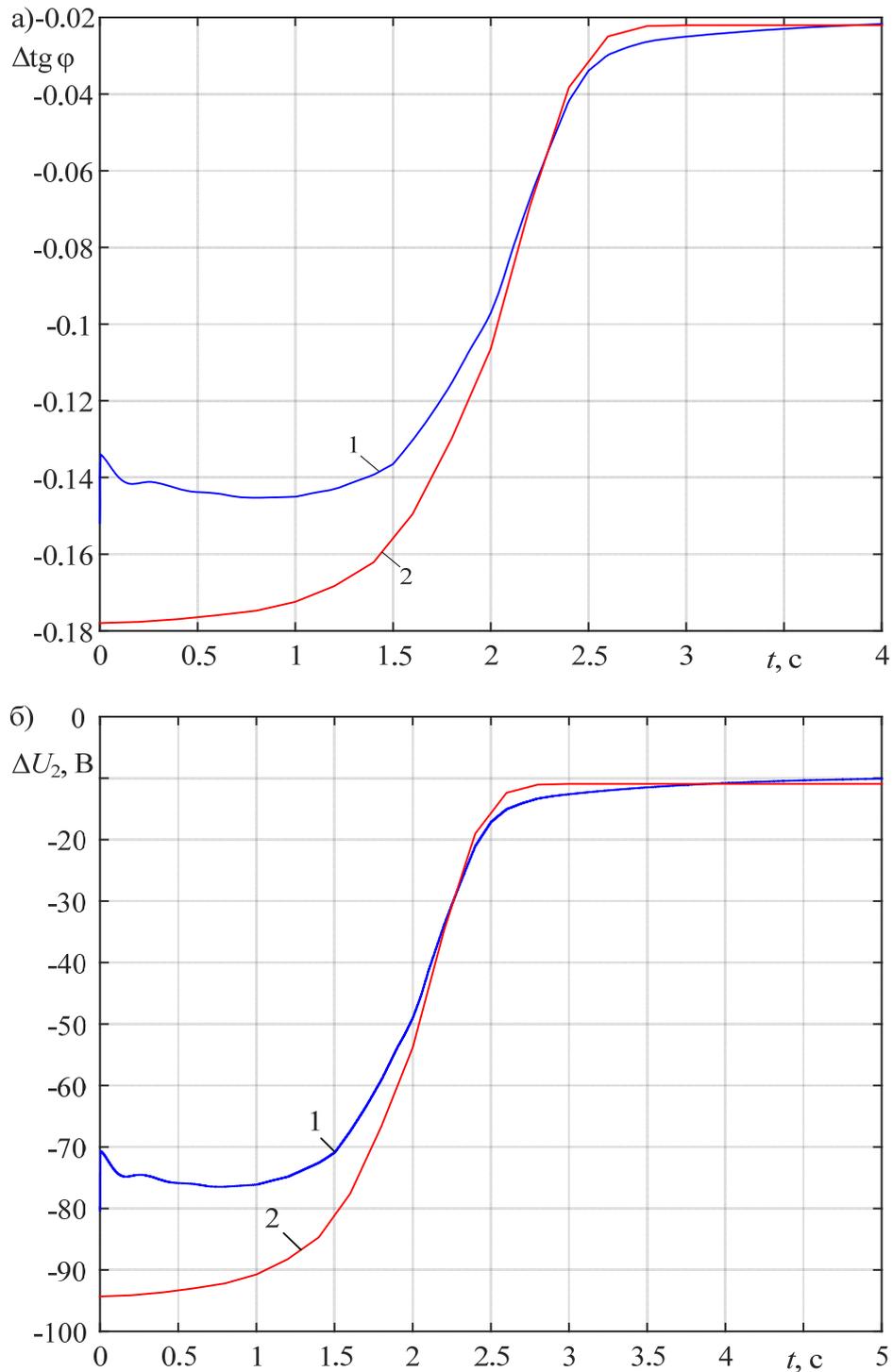


Рисунок 2.39 – Переходные характеристики  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  (а) и  $\Delta U_2(t)$  (б) при пуске асинхронного двигателя 4А225М2 УЗ: 1 – ключ К8 замкнут; 2 – ключ К8 разомкнут

Из анализа характеристик, представленных на рисунках 2.38 и 2.39, следует, что необходимо учитывать действие обратной связи по напряжению  $\Delta U_2$ , так как, в противном случае, максимальная погрешность в определении величины  $\Delta \theta$  достигает 8,7% (рисунок 2.38 при  $t = 5$  с), а максимальная погрешность  $\Delta \text{tg } \varphi$  и  $\Delta U_2$  – 24,5% (рисунок 2.39 при  $t = 0$ ).

## 2.7 Методика вычисления приращений реактивной мощности и угла нагрузки синхронного двигателя при колебании напряжения в сети.

### Погрешность методики

Содержание предыдущих разделов позволяет сформулировать методику вычислений приращений реактивной мощности  $\Delta Q_1$  и угла нагрузки  $\Delta\theta$  синхронного двигателя при колебании напряжения в сети на величину равную  $\Delta U_2$  при работе двигателя на постоянную нагрузку  $P_c = \text{const}$ .

Для заданного установившегося значения  $U_{01}$  вычисляется напряжение

$$U_{02} = \frac{U_{01}}{2} + \sqrt{\frac{U_{01}^2}{4} - P(R_T + R_L) - Q(x_T + x_L)}.$$

Задавшись величиной  $E_{q0}$  определяется величина угла

$$\theta_0 = \arcsin \frac{P_{1H} x_d}{\eta_H U_{02} E_{q0}}.$$

Зависимость реактивной мощности двигателя от угла нагрузки и ЭДС определяется из выражения

$$Q_1 = \frac{U_{02}(E_{q0} \cos \theta_0 - U_{02})}{x_d}.$$

Коэффициенты  $k_1, k_3, k_4$  определяются по соотношениям:

$$k_1 = -\text{tg } \theta_0;$$

$$k_3 = \frac{E_{q0} \cos \theta_0 - 2U_{02}}{x_d};$$

$$k_4 = -\frac{U_{02} E_{q0} \sin \theta_0}{x_d}.$$

Зависимости приращений  $\Delta Q_1, \Delta\theta, \Delta \text{tg } \varphi_1$  от  $\Delta U_2$  и  $U_{02}$  определяются из следующих выражений:

$$\Delta Q_1 = \left( \frac{k_1 k_4}{U_{02}} + k_3 \right) \Delta U_2; \quad \Delta\theta = k_1 \frac{\Delta U_2}{U_{02}}; \quad \Delta \text{tg } \varphi_1 = \frac{\Delta Q_1}{P_0}.$$

Значения  $\theta, Q_1$  и их отклонений  $\Delta\theta, \Delta Q_1, \Delta \text{tg } \varphi_1$ , коэффициентов  $k_1, k_3, k_4$  для различных величин  $E_{q0}$  при  $U_{02} = 6000$  В в узле нагрузки (полная мощность

$S = (2277 + j1227)$  кВА,  $P_0 = 2277$  кВт) при изменении напряжения на  $\Delta U_2 = 600$  В приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

$E_{q0}$ , кВ	8	9,25	10	11	11,8	13
$\theta$ , °	61,6	49,5	44,7	39,8	36,8	31,4
$Q_1$ , кВАр	-403	0	203	450	632	1070
$k_1$	-1,85	-1,17	-0,99	-0,83	-0,75	-0,61
$k_3$ , кА	-0,25	-0,18	-0,15	-0,109	-0,078	-0,0068
$k_4$ , кВАр	-1290	-1290	-1290	-1290	-1290	-1290
$\Delta Q_1$ , кВАр	88,8	41,7	37,8	42,5	50	74,7
$\Delta\theta$ , °	-10,6	-6,7	-5,7	-4,8	-4,3	-3,5
$\Delta\text{tg } \varphi_{\text{H}}$	0,036	0,017	0,0153	0,017	0,022	0,03

Из анализа данных, представленных в таблице 2.7 и следует, что с увеличением ЭДС  $E_q$  отклонение величины угла по абсолютной величине уменьшается от  $\Delta\theta_1 = 10,6^\circ$  до  $\Delta\theta_2 = 3,5^\circ$ , а отклонение коэффициента реактивной мощности  $\Delta\text{tg } \varphi$  вначале уменьшается от  $\Delta\text{tg } \varphi_{\text{H}1} = 0,036$  до  $\Delta\text{tg } \varphi_{\text{H}2} = 0,0153$ , а затем вновь растет до максимальной величины  $\Delta\text{tg } \varphi_{\text{H}3} = 0,03$ . Минимальное отклонение коэффициента реактивной мощности  $\Delta\text{tg } \varphi$  приходится на режим работы двигателя при  $\theta \approx 45^\circ$ .

Для оценки погрешности предложенной методики вычисления реактивной мощности синхронного двигателя используется формула (4.58) в [89]:

$$Q_1 = a_3 \left( \sqrt{a_1 k_U^2 - a_2^2} - k_U^2 \right) Q_{1\text{H}},$$

где  $a_1 = 1 + 2x_{*d} \sin \varphi_{\text{H}} + x_{*d}^2$ ,  $a_2 = x_{*d} \cos \varphi_{\text{H}}$ ,  $a_3 = (x_{*d} \sin \varphi_{\text{H}})^{-1}$ ,  $k_U = U_2 / U_{02}$ .

После ее линеаризации в приращениях

$$\Delta Q_1 = a_3 \left( \frac{a_1}{\sqrt{a_1 - a_2^2}} - 2 \right) Q_{1\text{H}} \Delta U_{*2}.$$

При  $x_{*d} = 1,33$ ,  $\cos \varphi_{\text{H}} = 0,9$ ,  $\sin \varphi_{\text{H}} = 0,436$ ,  $Q_{1\text{H}} = 632$  кВАр,  $\Delta U_{*2} = 0,1$  значения коэффициентов  $a_1 = 5,088$ ,  $a_2 = 0,93$ ,  $a_3 = 1,72$ , величина  $\Delta Q_1 = 51,8$  кВАр.

Из таблицы 2.7 значение  $\Delta Q_1 = 50$  кВАр, погрешность  $\delta = 3,5\%$ .

## 2.8 Погрешность системы управления коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом без обратных связей

В состав данного электропривода входят объект управления и тиристорный возбудитель. Его структурная схема представлена на рисунке 2.31. К основным погрешностям относится погрешность от нестабильности напряжения в сети, величина которой зависит от режима работы синхронного двигателя и может изменяться (таблица 2.7) от  $\Delta \text{tg } \varphi_{\text{н min}} = 0,0153$  до  $\Delta \text{tg } \varphi_{\text{н max}} = 0,036$  при изменении напряжения на 10% от номинальной величины. При  $Q_1 = Q_{1\text{н}} = 632$  кВАр величина  $\Delta \text{tg } \varphi_{\text{нн}} = 0,022$ .

Погрешность от нестабильности асинхронной нагрузки в узле (коммутации асинхронных двигателей) вычисляется по формуле

$$\Delta \text{tg } \varphi_{\text{д}} = \text{tg } \varphi_{\text{д}} - \text{tg } \varphi_{\text{дз}}.$$

Заданная величина коэффициента РМ

$$\text{tg } \varphi_{\text{дз}} = \frac{Q_0 - Q_1}{P_0}.$$

Текущее значение

$$\text{tg } \varphi_{\text{д}} = \frac{Q_0 - Q_1 + \Delta Q_{2\text{max}}}{P_0 + \Delta P_{2\text{max}}},$$

где  $P_0, Q_0$  – установившиеся значения активной и реактивной мощности;  $\Delta P_{2\text{max}}, \Delta Q_{2\text{max}}$  – максимальные значения приращения мощности при включении (отключении) нескольких асинхронных двигателей.

Требуемое значение реактивной мощности синхронного двигателя для обеспечения заданной величины коэффициента РМ узла нагрузки определяется из соотношения

$$Q_1 = Q_0 - P_0 \text{tg } \varphi_{\text{дз}}.$$

Вычисленные значения

$$\Delta \text{tg } \varphi_{\text{д1}} = \text{tg } \varphi_{\text{д1}} - \text{tg } \varphi_{\text{з}}$$

при поочередном включении двух двигателей марки А113-4М ( $P_{2\text{н}} = 250$  кВт) и

$$\Delta \text{tg } \varphi_{\text{д2}} = \text{tg } \varphi_{\text{д2}} - \text{tg } \varphi_{\text{з}}$$

при отключении этих двигателей для заданных значений величин  $\text{tg } \varphi_3 = 0 \dots 0,4$  при  $P_0 = 2277$  кВт,  $Q_0 = 1227$  кВАр,  $\Delta P_{2\text{max}} = \Delta P_{2\text{ЭН}} = 543$  кВт,  $\Delta Q_{2\text{max}} = \Delta Q_{2\text{ЭН}} = 308$  кВАр приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

$\text{tg } \varphi_3$	0	0,1	0,2	0,24	0,3	0,4
$Q_1$ , кВАр	1227	1049	822	731	594	366
$\Delta \text{tg } \varphi_{д1}$	0,11	0,04	0,03	0,06	0,04	0,12
$\Delta \text{tg } \varphi_{д2}$	0,18	0,1	0,11	0,1	0,08	0,04

Как следует из анализа данных таблицы 2.8 максимальная погрешность  $\Delta \text{tg } \varphi_{д} = 0,18$  от нестабильности асинхронной нагрузки соответствует коэффициенту РМ  $\text{tg } \varphi_3 = 0$ .

Максимальная погрешность с учетом температурной погрешности  $\Delta \text{tg } \varphi_{\nu} = 0,012$  (увеличивается сопротивление обмотки возбуждения из-за повышения температуры окружающей среды на величину  $\Delta \nu_c = 40^\circ\text{C}$ ) составила

$$\Delta \text{tg } \varphi_{\text{max}} = \Delta \text{tg } \varphi_{\nu} + \Delta \text{tg } \varphi_{\text{нн}} + \Delta \text{tg } \varphi_{\text{дmax}} = 0,012 + 0,022 + 0,18 = 0,214. \quad (2.47)$$

Заданное значение погрешности  $\Delta \text{tg } \varphi_3 \leq 0,02 \div 0,05$  не может быть обеспечено в системе управления КРМ УН с синхронным электроприводом без обратных связей.

## 2.9 Выводы по второй главе

2.9.1. Из нескольких схем систем электроснабжения различного назначения выделена их общая часть, включающая один или два силовых трансформатора, линию электропередачи, батарею конденсаторов, асинхронные и синхронные электродвигатели и названная обобщенной системой электроснабжения, режим работы которой рассматривается с целью управления ее коэффициентом реактивной мощности за счет изменения напряжения возбуждения синхронного двигателя.

2.9.2. Получена математическая модель синхронного двигателя в виде структурной схемы с передаточными функциями типовых звеньев и учитывающая колебание напряжения в сети.

2.9.3. На базе модели синхронного двигателя с добавлением в нее соотношений, описывающих электромагнитные процессы в линии питания, асинхронных двигателях и конденсаторной батарее, разработана математическая модель системы электроснабжения как объекта управления. Состояние этого объекта характеризуется следующими выходными координатами: реактивной мощностью, напряжением и коэффициентом реактивной мощности узла нагрузки. Управляющее воздействие – напряжение возбуждения синхронного двигателя. К возмущающим воздействиям относятся: напряжение сети, изменение мощности асинхронной нагрузки, короткие замыкания в цепи питания, момент нагрузки синхронного двигателя.

2.9.4. Разработана методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным, на базе которой построена методика расчета активной и реактивной мощности при его разгоне. Усредненная величина погрешности методики расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя не превышает 2%. Погрешность методики расчета активной и реактивной мощности, не учитывающей влияние электромагнитных процессов, составляет 3,8%.

2.9.5. Разработана методика расчета приращений реактивной мощности синхронного двигателя для различных режимов его работы при колебании напряжения в сети. В номинальном режиме погрешность методики равна 3,5%.

2.9.6. Показано, что в математической модели системы электроснабжения необходимо учитывать действие обратной связи по напряжению, так как в противном случае динамическая погрешность в определении угла нагрузки достигает 8,7%, а коэффициента реактивной мощности – 24,5%.

2.9.7. Показано, что заданное значение погрешности  $\text{tg } \varphi_3 \leq 0,02 \div 0,05$  не может быть обеспечено в системе управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения с синхронным электроприводом без обратных связей. Этого можно добиться применением автоматизированного электропривода с программным управлением.

### 3 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ СИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

В данном разделе рассматриваются системы управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения, синхронные электроприводы которой имеют связи по различным переменным.

#### 3.1 Синхронный электропривод с обратной связью по току возбуждения

Структурная схема синхронного электропривода с обратной связью по току возбуждения  $\Delta I_f$  при управлении КРМ УН представлена на рисунке 3.1а, а развернутая схема контура регулирования тока возбуждения представлена на рисунке 3.1б.

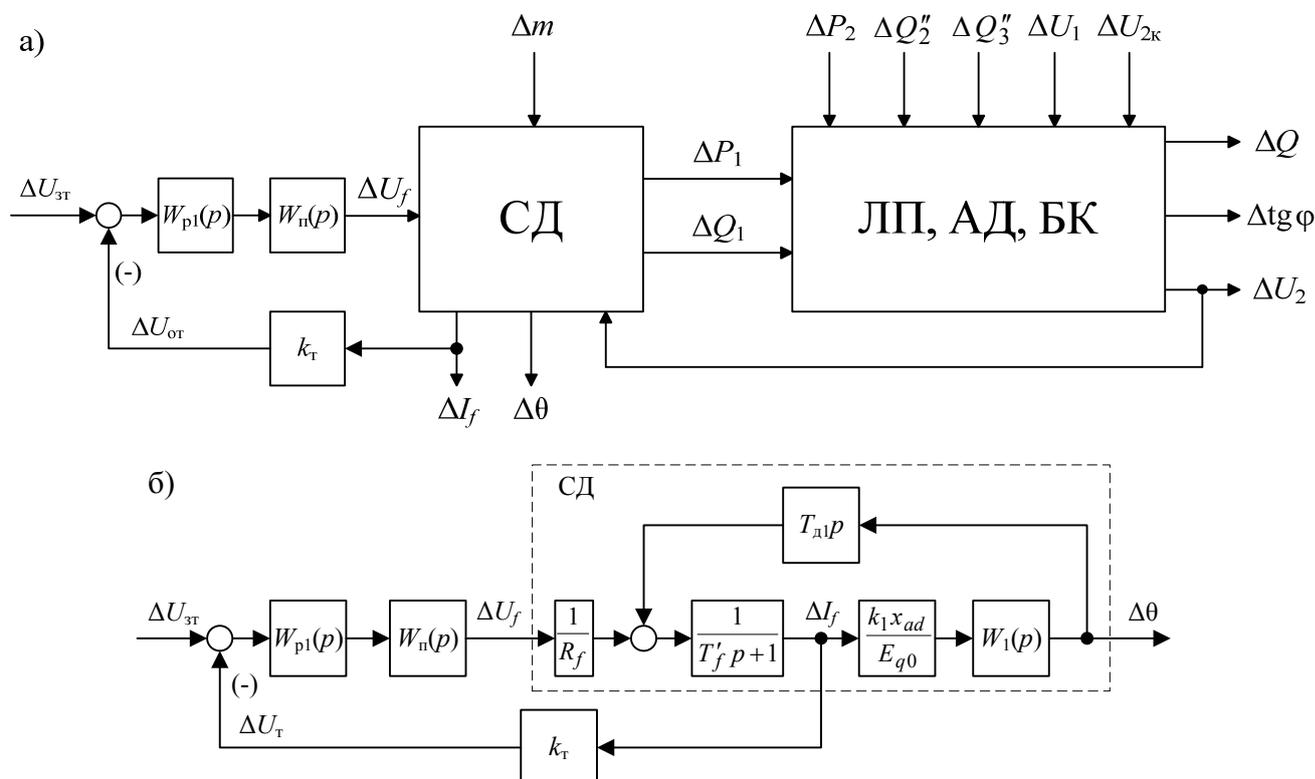


Рисунок 3.1 – Структурные схемы: а) САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом с ООС по  $\Delta I_f$ ; б) контура регулирования тока возбуждения

В состав схемы (рисунок 3.1б) входят следующие элементы: модель синхронного двигателя; тиристорный возбудитель с передаточной функцией

$$W_{\Pi}(p) = \frac{k_{\Pi}}{T_{\mu}p + 1};$$

регулятор тока возбуждения –  $W_{p1}(p)$ ; датчик тока возбуждения –  $k_T$ .

С целью упрощения дальнейших расчётов модель синхронного двигателя более удобно представить односвязными блоками, как это представлено на рисунке 3.2.

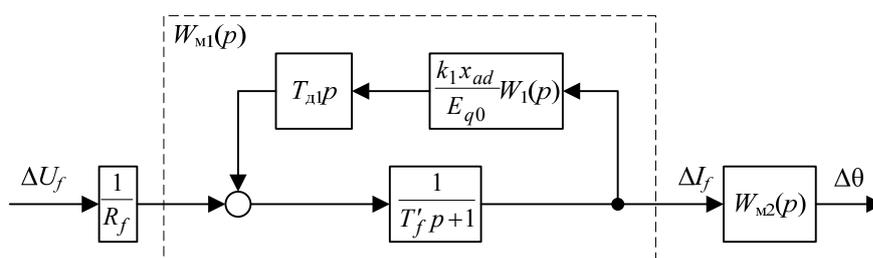


Рисунок 3.2 – Блочная схема двигателя

На этой схеме обозначены:

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_1 T_1 p + 1};$$

$$W_{M2}(p) = \frac{k_1 x_{ad}}{E_{q0}} W_1(p).$$

Первую часть структурной схемы (рисунок 3.2) можно свернуть, представив одним блоком с передаточной функцией

$$W_{M1}(p) = \frac{\frac{1}{T'_f p + 1}}{1 - \frac{k_1 x_{ad} T_{d1} p}{E_{q0} (T'_f p + 1) (T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_1 T_1 p + 1)}} = \frac{T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_1 T_1 p + 1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1},$$

где  $a_1 = 2\varepsilon_1 T_1 + T'_f - T_{d2}$ ,  $a_2 = T_1 (T_1 + 2\varepsilon_1 T'_f)$ ,  $a_3 = T_1^2 T'_f$ ,  $T_{d2} = \frac{k_1 x_{ad}}{E_{q0}} T_{d1}$ .

После определения корней характеристического уравнения

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1 = 0$$

эту передаточную функцию можно представить в виде произведения передаточных функций типовых динамических звеньев

$$W_{M1}(p) = \frac{T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_1 T_1 p + 1}{(T_3 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\varepsilon_2 T_2 p + 1)}.$$

Вычисленные значения параметров передаточной функции  $W_{M1}(p)$  в зависимости от величины момента инерции  $J$  синхронного электропривода приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Момент инерции $J$ , кг·м <sup>2</sup>		Параметры передаточных функций $W_{M1}(p)$				
		$T_1$ , с	$\varepsilon_1$	$T_2$ , с	$T_3$ , с	$\varepsilon_2$
Вариант 1	31,9	0,075	0,38	0,046	0,97	0,273
Вариант 2	535	0,31	0,097	0,197	0,91	0,223

В этом случае схема (рисунок 3.2) упрощается до двухблочной схемы (рисунок 3.3) с двумя выходными координатами.

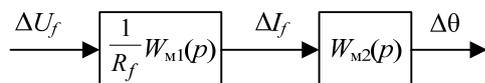


Рисунок 3.3 – Двухблочная схема двигателя

Тогда расчётная структурная схема разомкнутого контура регулирования тока возбуждения (без регулятора тока) представлена на рисунке 3.4.

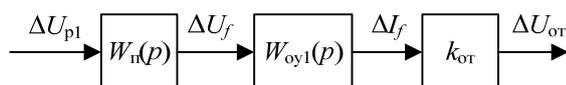


Рисунок 3.4 – Расчетная схема разомкнутого контура регулирования тока возбуждения

На этой схеме обозначены:

$$W_{oy1}(p) = R_f^{-1} W_{M1}(p);$$

$$W_{oy2}(p) = W_{M2}(p).$$

На рисунке 3.5 представлены логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура регулирования тока возбуждения, построенные по неупрощенной передаточной функции:

$$W_{pT}(p) = \frac{k_{\Pi} k_T (T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_1 T_1 p + 1)}{R_f (T_{\mu} p + 1) (T_3 p + 1) (T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_2 T_2 p + 1)} \quad (3.1)$$

и аппроксимированной передаточной функции

$$W_{pTa}(p) = \frac{k_{\Pi} k_T}{R_f (T_{\mu} p + 1)(T_3 p + 1)} \quad (3.2)$$

при  $k_{\Pi} k_T / R_f = 1$  для двух вариантов объекта управления (таблица 3.1) при  $k_{\Pi} = 4$ ,  $T_{\mu} = 0,01$  с,  $R_f = 0,18$  Ом,  $X_{ad} = 52$  Ом,  $E_{q0} = 11800$  В.

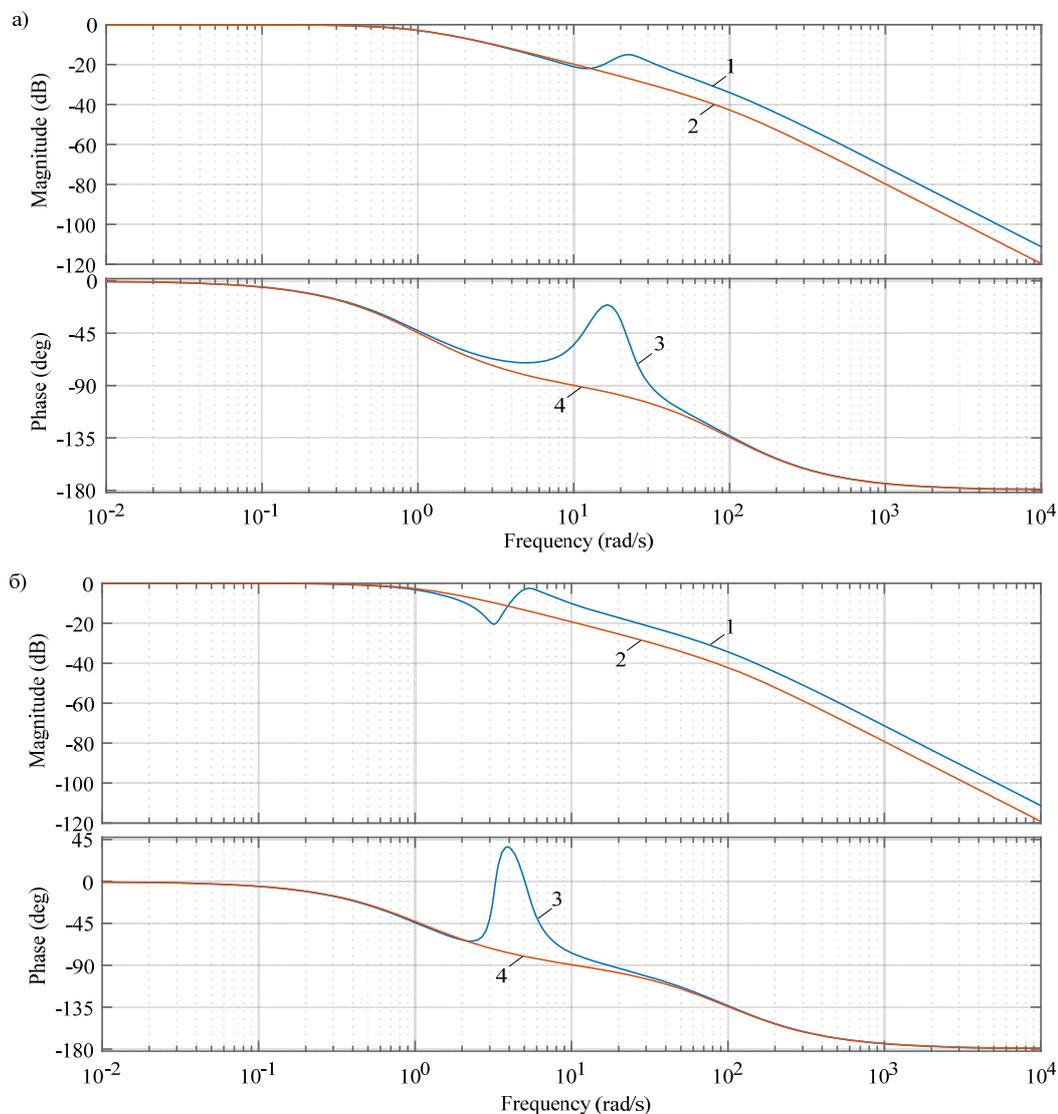


Рисунок 3.5 – Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики разомкнутого контура регулирования тока возбуждения (1, 3 – исходные (3.1); 2, 4 – аппроксимированные (3.2)) для двух вариантов объекта управления (таблица 3.1): а) – первый вариант ОУ; б) – второй вариант ОУ

Как следует из их анализа, исходные частотные характеристики, построенные по выражению (3.1) в диапазоне частот, начиная от  $\omega = 20,4$  с<sup>-1</sup> и выше, с погрешностью менее 10 дБ могут быть аппроксимированы характеристиками апериодического звена второго порядка с передаточной функцией (3.2).

Структурная схема контура регулирования тока возбуждения [53-57] представлена на рисунке 3.6, а её реализация в Matlab-Simulink – на рисунке 3.7.

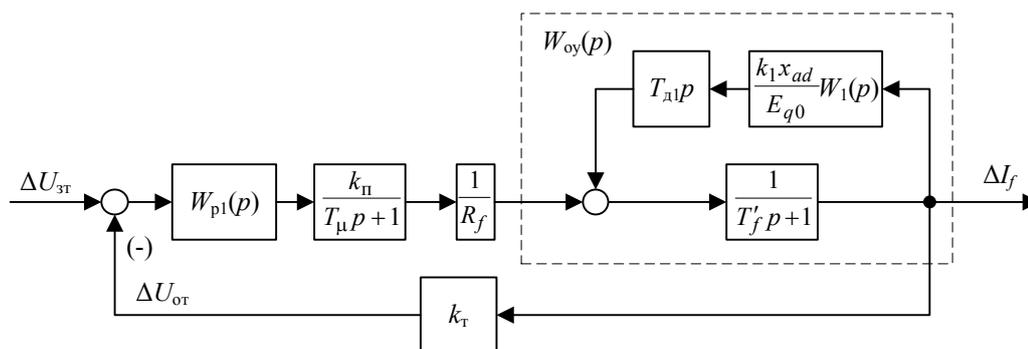


Рисунок 3.6 – Структурная схема контура регулирования тока возбуждения с ПИД-регулятором

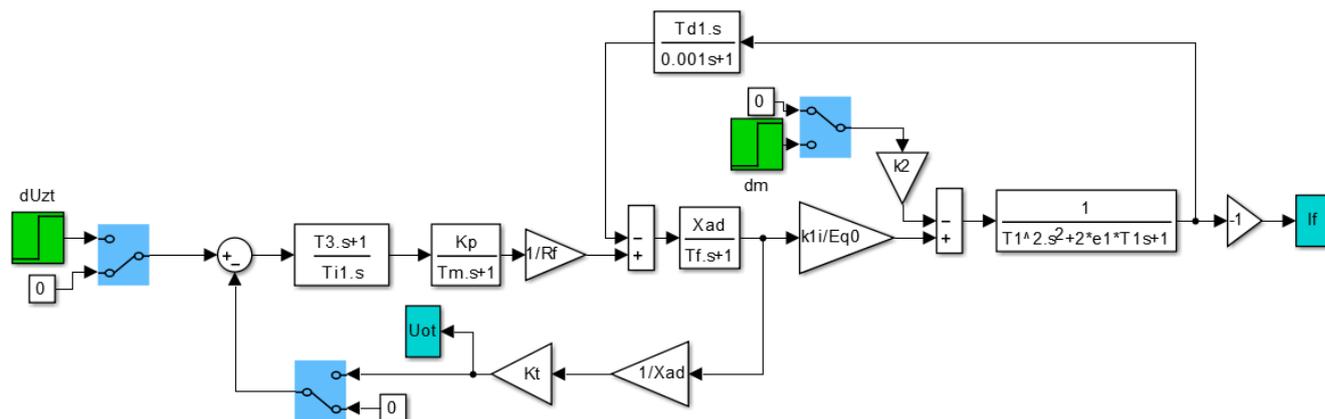


Рисунок 3.7 – Схема реализации контура регулирования тока возбуждения в MATLAB Simulink

При действии возмущений (короткие замыкания, колебания напряжения, коммутация нагрузок и т.д.) в синхронном электродвигателе возникают переходные процессы (рисунки 2.14-2.19, 2.22-2.25), в результате которых, особенно при работе двигателя в номинальном режиме, он будет перегружен как по мощности, так и по электромагнитному моменту, что неблагоприятно отражается на долговечности электрической и механической части электропривода. Поэтому с целью уменьшения негативного влияния этих процессов их действие необходимо минимизировать, а синтез регуляторов производить по критерию максимального быстрого действия

$$t_p = t_{\min} \quad (3.3)$$

при допустимых ограничениях на перерегулирование и величину запаса устойчивости по фазе:

$$\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_{\text{д}}; \quad (3.4)$$

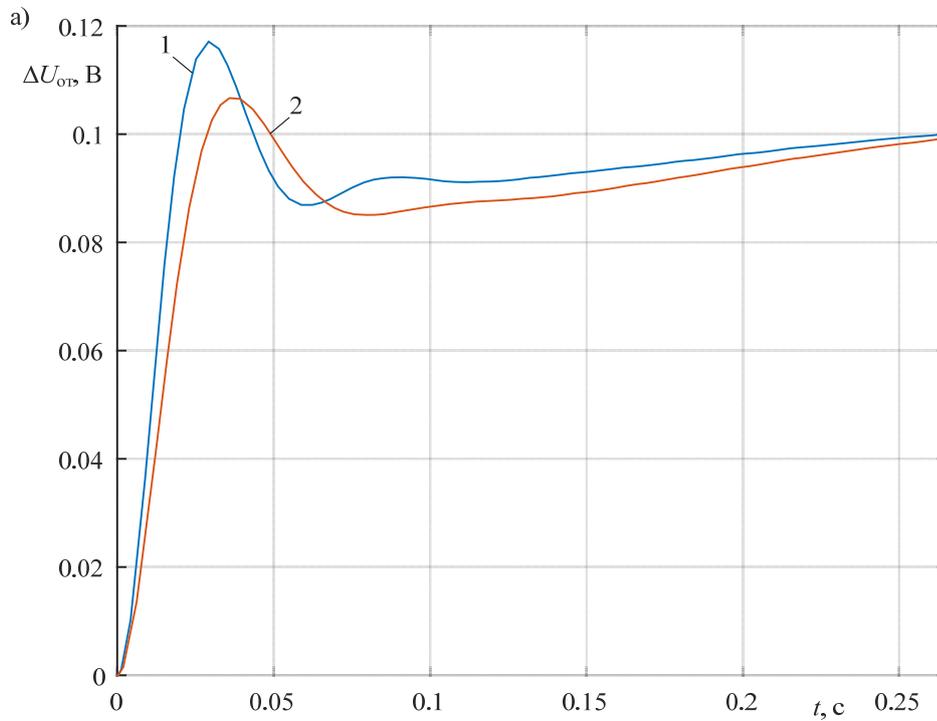
$$\Delta\varphi \geq |\Delta\varphi_{\text{д}}|; \quad (3.5)$$

При настройке контура по условиям модульного оптимума [85] передаточная функция регулятора будет совпадать с передаточной функцией пропорционально-интегрального звена:

$$W_{PI}(p) = \frac{T_3 p + 1}{T_{и1} p},$$

где  $T_{и1} = 2T_{\mu}$ .

Контур регулирования в этом случае будет обладать свойствами астатического звена первого порядка. Переходные характеристики такого контура по управляющему воздействию  $\Delta U_{3T} = 0,1(t)$  В для двух вариантов объекта управления (таблица 3.1) представлены на рисунке 3.8.



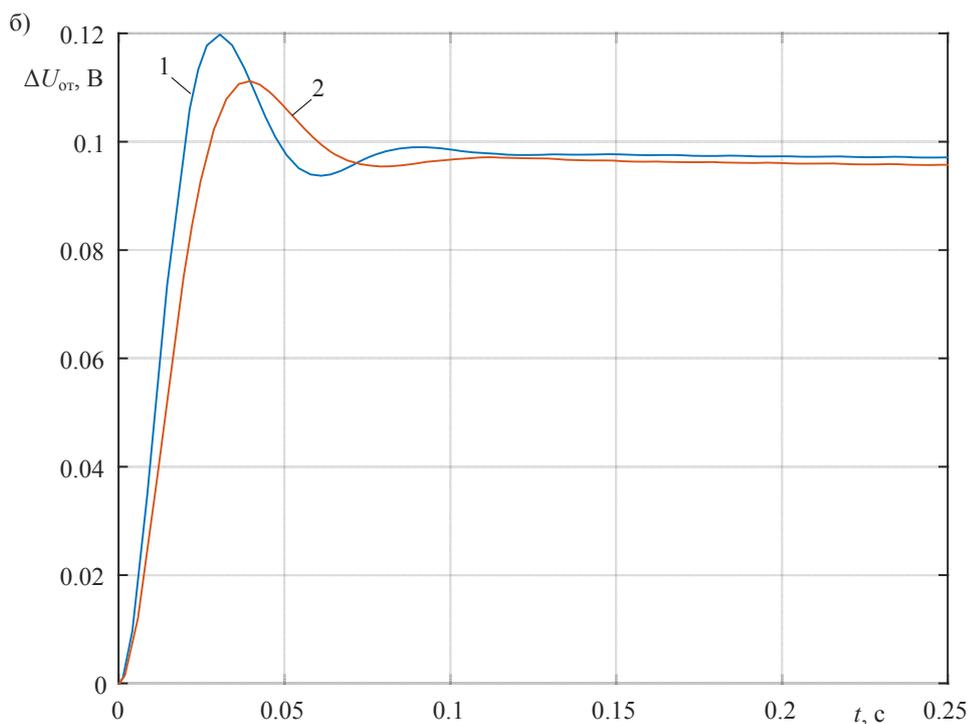


Рисунок 3.8 – Переходные характеристики по  $\Delta U_{от}(t) = 0,1$  В в контуре регулирования тока возбуждения, где кривая 1 при  $T_{и1} = 0,02$  с, а кривая 2 –  $T_{и1} = 0,025$  с: а) – вариант 1; б) – вариант 2

Переходные характеристики, соответствующие настройке контура по условиям модульного оптимума (кривые 2), отличаются от стандартных характеристик ( $\sigma = 4,3\%$ ). Это объясняется наличием в частотных характеристиках (рисунок 3.5) резонансных всплесков. Отличие будет тем меньше, чем дальше они расположены от частоты среза контура. Квазиоптимальной настройкой является настройка при  $T_{и1} = 0,025$  с, а не при  $T_{и1} = 0,02$  с.

Если к контуру не предъявляются повышенные требования (например не требуется обеспечения свойств астатического звена), то вполне хороших показателей качества регулирования можно достичь в контуре с пропорциональным регулятором, настроив этот контур на определенное демпфирование.

Требуемое значение коэффициента усиления регулятора  $k_{рт}$  можно найти из условия равенства соответствующих коэффициентов исходного характеристического полинома

$$D_1(p) = \frac{T_\mu T_3}{1 + k_{оу} k_{рт}} p^2 + \frac{T_\mu + T_3}{1 + k_{оу} k_{рт}} p + 1$$

и квазиоптимального полинома ( $\varepsilon = \sqrt{2}/2$ )

$$D_2(p) = T_1^2 p^2 + 2\varepsilon T_1 + 1.$$

Приравнивая в этих уравнениях коэффициенты при одинаковых степенях переменной  $p$ , получим систему уравнений:

$$T^2 = \frac{T_\mu T_3}{k_{\text{оу}} k_{\text{рТ}} + 1},$$

$$2\varepsilon T = \frac{T_\mu + T_3}{k_{\text{оу}} k_{\text{рТ}} + 1},$$

из решения которой получаем:

$$k_{\text{рТ}} = \frac{1}{k_{\text{оу}}} \left( \frac{(T_\mu + T_3)^2}{4\varepsilon^2 T_\mu T_3} - 1 \right).$$

При  $T_\mu = 0,01$  с,  $T_3 = 0,98$  и  $T_3 = 0,91$ ,  $\varepsilon = \sqrt{2}/2$ , величина  $k_{\text{рТ}} = 49,5$ . На рисунке 3.9, 3.10 представлены переходные характеристики замкнутого контура с реальным и аппроксимированным объектами управления с различными коэффициентами пропорциональности ( $k_{\text{рТ}} = 40; 60; 80$ ).

Из анализа этих характеристик следует, что при  $k_{\text{рТ}} \leq 40$  нельзя пренебрегать колебательными звеньями в (3.1). В противном случае, переходный процесс становится слабо демпфированным и значительно затянутым.

Наиболее благоприятен переходный процесс при  $k_{\text{рТ}} = 60$  с перерегулированием  $\sigma = 13,20\%$  и временем регулирования  $t_p = 0,065$  с. Это время соизмеримо со временем  $t_{p2} = 0,06$  с в контуре с пропорционально-интегральным регулятором.

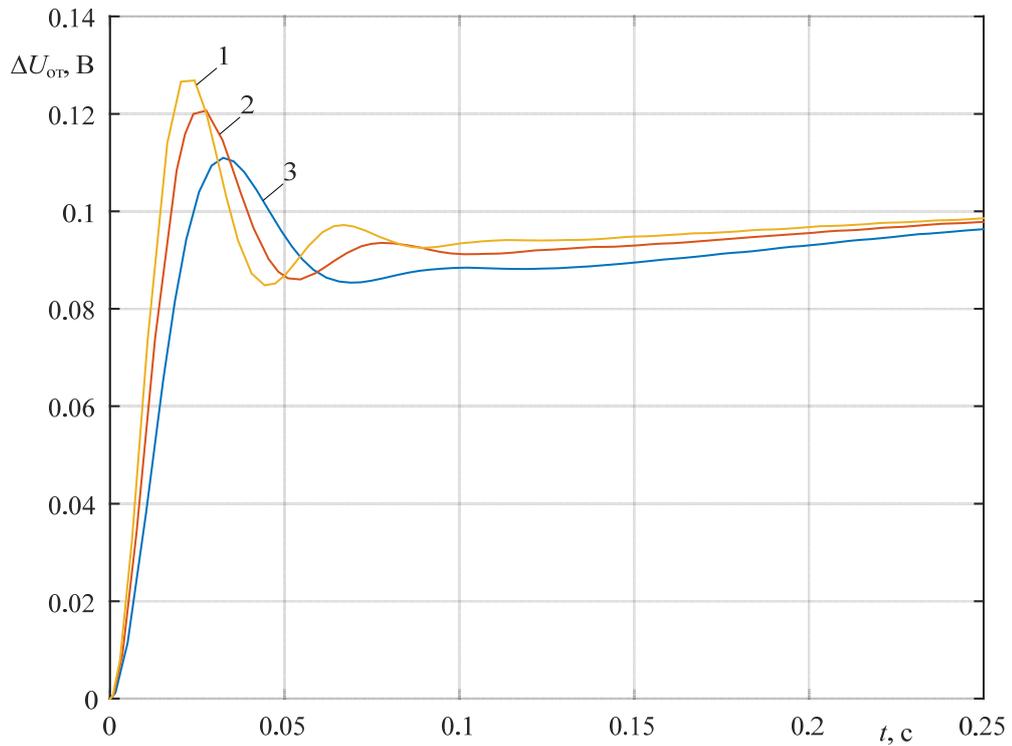


Рисунок 3.9 – Переходные характеристики по  $\Delta U_{\text{отв}}(t) = 0,1$  В в контуре регулирования тока возбуждения (1 –  $k_{\text{рт}} = 40$ , 2 –  $k_{\text{рт}} = 60$ , 3 –  $k_{\text{рт}} = 80$ ) для 1-го варианта объекта управления

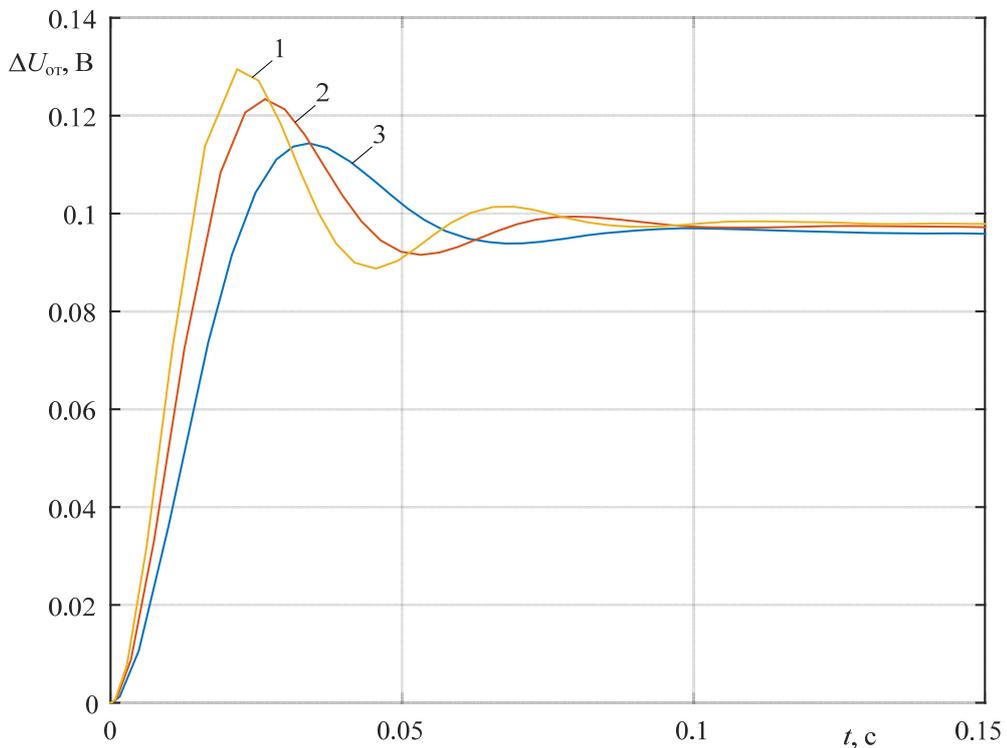


Рисунок 3.10 – Переходные характеристики по  $\Delta U_{\text{отв}}(t) = 0,1$  В в контуре регулирования тока возбуждения (1 –  $k_{\text{рт}} = 40$ , 2 –  $k_{\text{рт}} = 60$ , 3 –  $k_{\text{рт}} = 80$ ) для 2-го варианта объекта управления

Максимальная погрешность системы управления КРМ узла нагрузки с внутренней связью по току (с ПИ-регулятором) возбуждения будет меньше по-

грешности (2.47) системы управления с синхронным электроприводом без обратных связей на величину температурной погрешности  $\Delta \text{tg } \varphi_v = 0,012$  и составляет (раздел 2.8)  $\Delta \text{tg } \varphi_{\max} = 0,2$ .

### 3.2 Синхронный электропривод с обратной связью по внутреннему углу двигателя

Структурная схема синхронного электропривода представлена на рисунке 3.11.

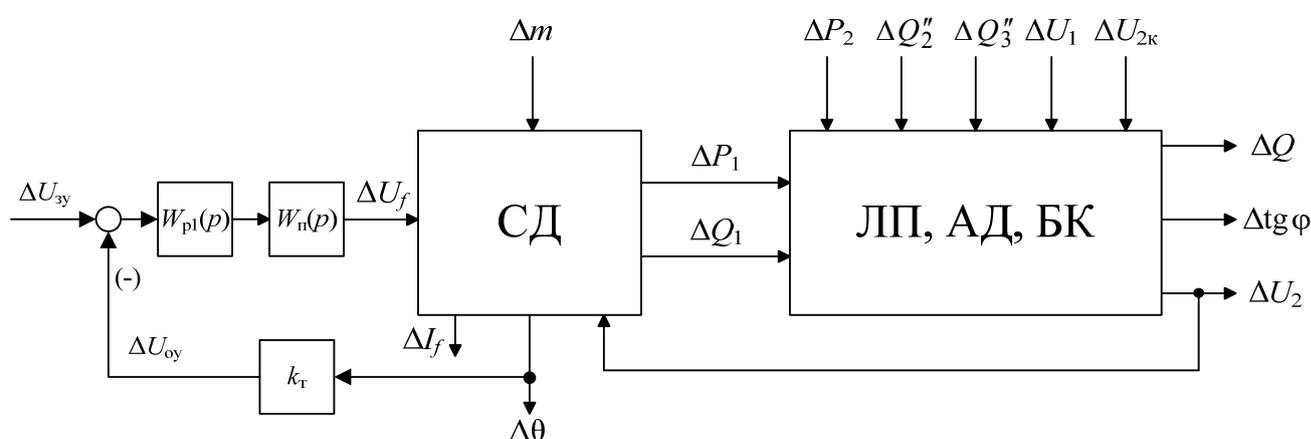


Рисунок 3.11 – Структурная схема электропривода с обратной связью по внутреннему углу двигателя

Коэффициент передачи датчика угла  $k_{\text{дy}} = 13,6$  в/рад выбран из условия равенства коэффициента усиления разомкнутого контура (без регулятора) единице, т.е.

$$\frac{k_1 X_{ad} k_{\text{дy}}}{k_T E_{q0}} = 1.$$

В результате расчета контура регулирования угла  $\theta$  с передаточной функцией объекта управления

$$W_{\text{oy}}(p) = \frac{1}{(T_{\mu} p + 1)(T_3 p + 1)(T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_2 T_1 p + 1)}$$

и частотными характеристиками объекта управления (рисунок 3.12), по критерию (3.3) и ограничениям (3.4), (3.5) получен регулятор угла нагрузки с передаточной функцией [53-57]:

$$W_{\text{py}}(p) = \frac{(T_7 p + 1)(T_6 p + 1)^2}{T_{\text{и2}} p (T_{\phi 1} p + 1)(T_{\phi 2} p + 1)},$$

где постоянные времени фильтров  $T_{\phi 1} = T_{\phi 2} = 0,001$  с, а другие постоянные времени оказались равными:  $T_6 = 0,064$  с,  $T_7 = 0,1$  с,  $T_{\text{и2}} = 0,005$  с, в системе с первым вариантом объекта управления (таблица 3.1) и  $T_6 = 0,1$  с,  $T_7 = 0,28$  с,  $T_{\text{и2}} = 0,003$  с – со вторым вариантом объекта управления.

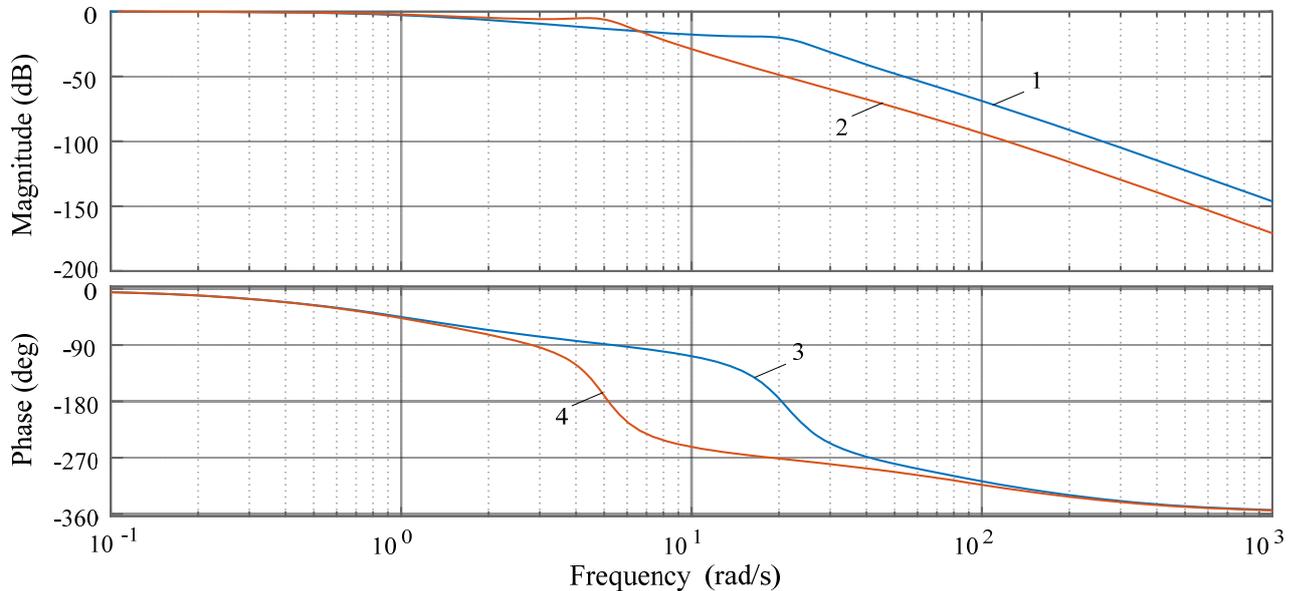


Рисунок 3.12 – Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики разомкнутого объекта управления (тиристорный преобразователь, синхронный двигатель, датчик угла  $\theta$ ): 1, 3 – первый вариант ОУ; 2, 4 – второй вариант ОУ

Одноконтурная система управления углом  $\theta$ , реализованная в MATLAB Simulink, представлена на рисунке 3.13, а ее частотные характеристики в разомкнутом состоянии для двух вариантов – на рисунке 3.14.



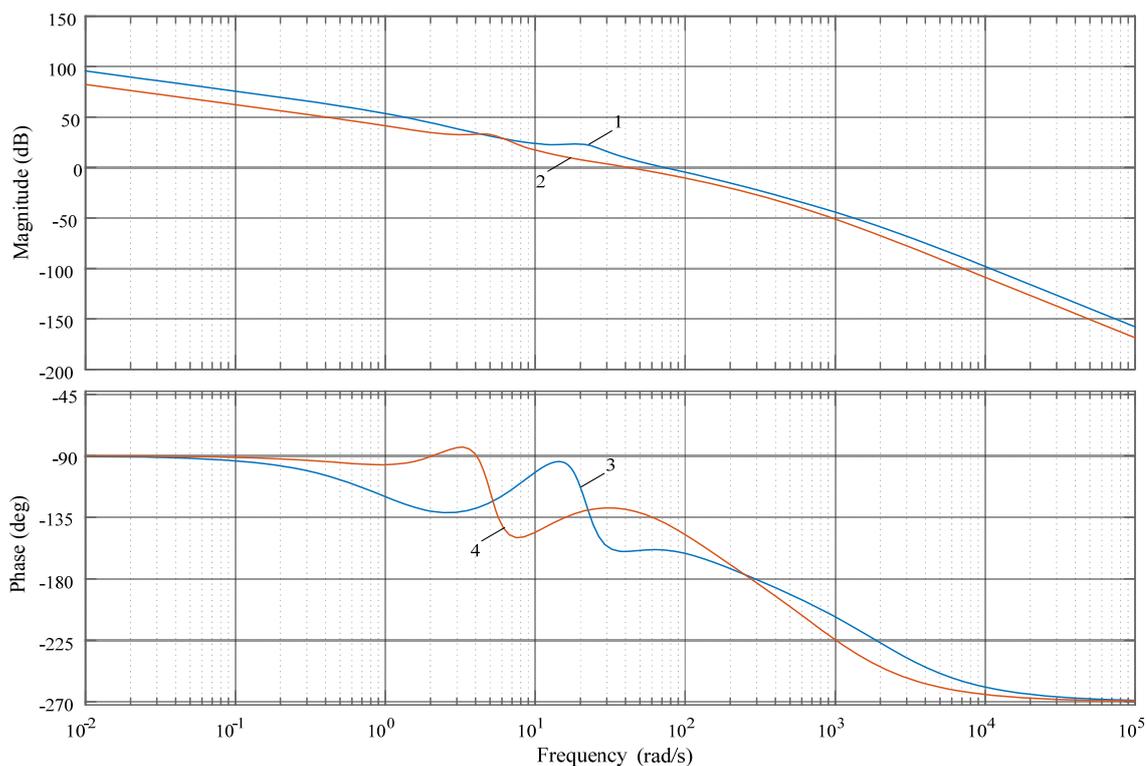


Рисунок 3.14 – Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики разомкнутой одноконтурной системы: 1, 3 – первый вариант ОУ; 2, 4 – второй вариант ОУ

Переходные характеристики  $\Delta U_{\text{дУ}}$  по воздействию  $\Delta U_3 = 0,1(t)$  В представлены на рисунке 3.15.

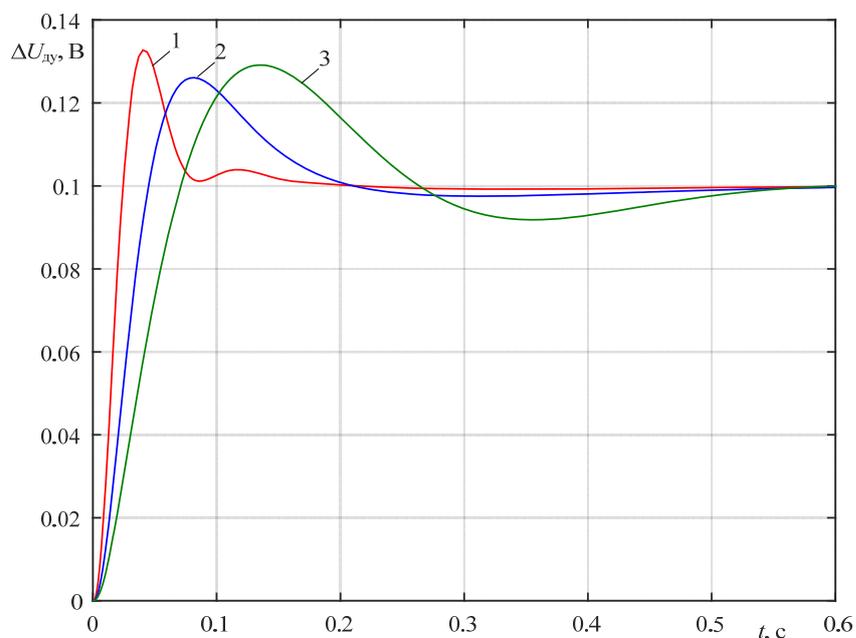
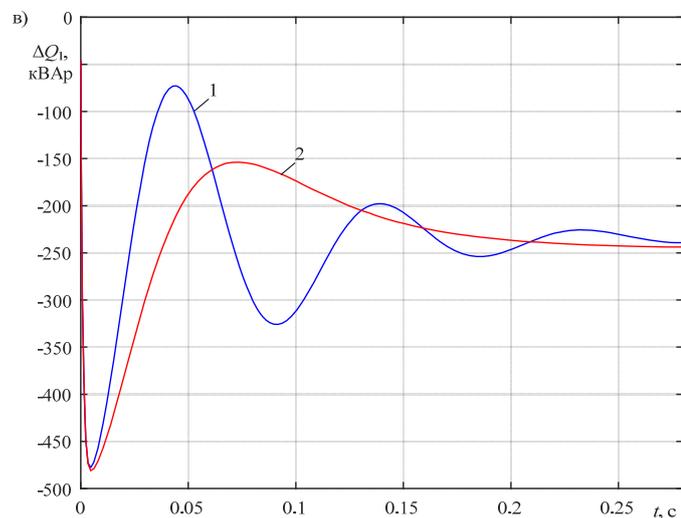
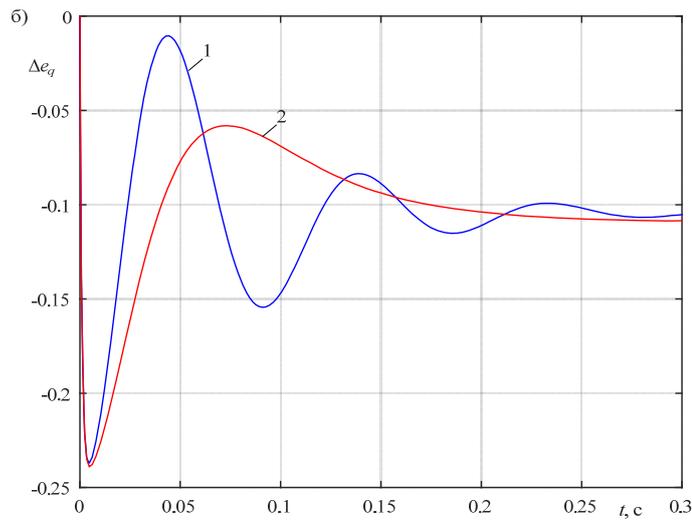
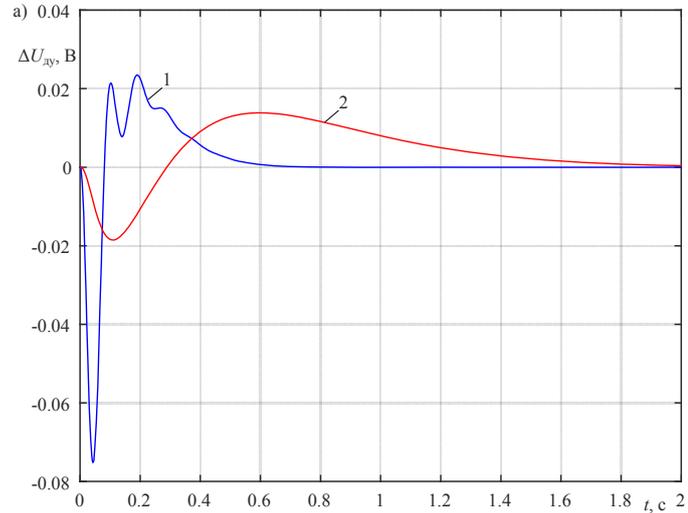


Рисунок 3.15 – Переходные характеристики  $\Delta U_{\text{дУ}}$  при воздействии по  $\Delta U_3 = 0,1(t)$  В в одноконтурной системе управления для второго варианта ОУ (1 –  $T_{и2} = 0,003$  с, 2 –  $T_{и2} = 0,007$  с, 3 –  $T_{и2} = 0,015$  с)

Критерию (3.3) соответствуют характеристики (рисунки 3.15), при  $T_{и2} = 0,0015$  с (первый вариант) и  $T_{и2} = 0,003$  с (второй вариант).

Переходные характеристики  $\Delta U_{дв}(t)$ ,  $\Delta e_q(t)$ ,  $\Delta \theta(t)$ ,  $\Delta Q_1(t)$ ,  $\Delta U_2(t)$ ,  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  при изменении напряжения в сети  $\Delta U_2(t) = 600$  В для обоих вариантов представлены на рисунке 3.16.



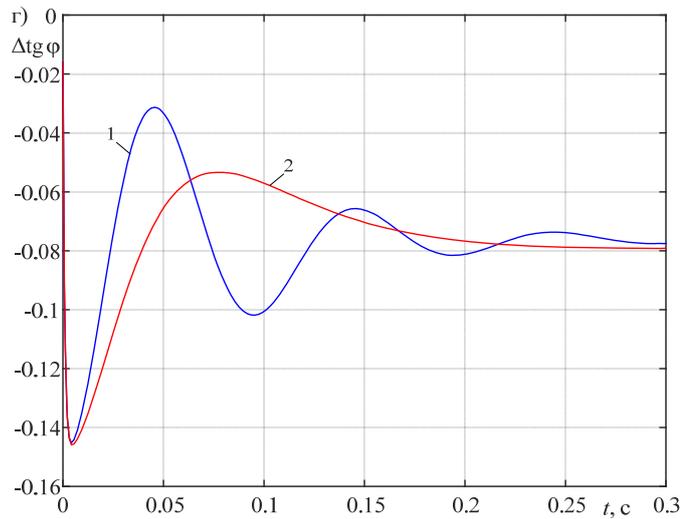


Рисунок 3.16 – Переходные характеристики в одноконтурной системе управления углом  $\theta$  при изменении напряжения в сети  $\Delta U_2(t) = 600 \text{ В}$  (1 – первый вариант, 2 – второй вариант) для выходных переменных: а) –  $\Delta U_{\text{дв}}(t)$ ; б) –  $\Delta e_q(t)$ ; в) –  $\Delta Q_1(t)$ ; г) –  $\Delta \text{tg } \varphi$

### 3.3 Синхронный электропривод с обратными связями по току возбуждения и внутреннему углу двигателя

Структурная схема системы управления с обратными связями по току возбуждения  $\Delta I_f$  и внутреннему углу двигателя  $\Delta \theta$  представлена на рисунке 3.17.

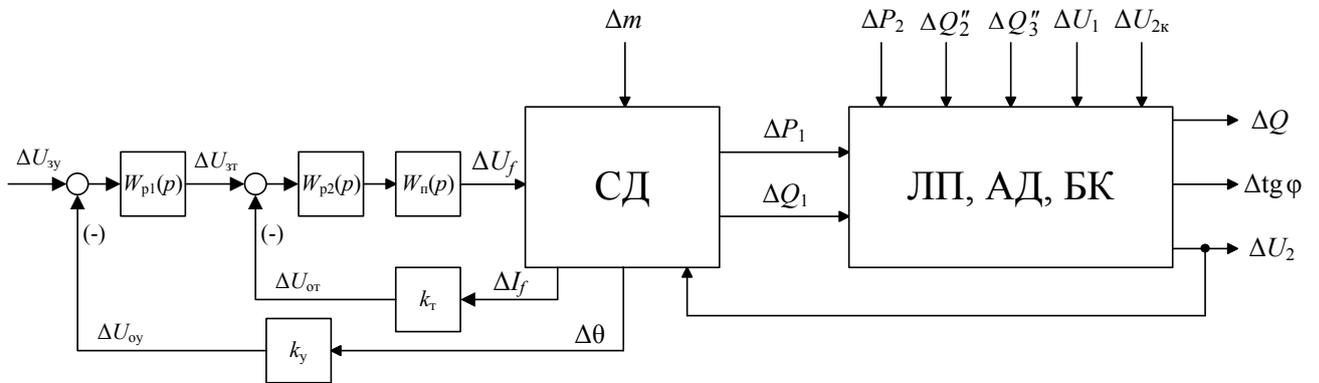


Рисунок 3.17 – Структурная схема электропривода с обратными связями по  $\Delta I_f$  и  $\Delta \theta$

Передаточная функция разомкнутого внешнего контура без регулятора угла имеет вид

$$W_{\text{оу}}(p) = \frac{1}{(T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_1 T_1 p + 1)(T_{\text{в1}}^2 p^2 + 2\varepsilon_3 T_{\text{в1}} p + 1)},$$

где  $T_{\text{в1}} = 0,014 \text{ с}$ ,  $\varepsilon_3 = 0,71$ .

Его частотны характеристики представлены на рисунке 3.18. В результате расчета получены значения параметров ПИД – регулятора угла нагрузки с передаточной функцией

$$W_{p2}(p) = \frac{(T_6 p + 1)(T_7 p + 1)}{T_{\phi 2} T_{и} p^2 + T_{и} p},$$

где постоянная времени фильтра  $T_{\phi 2} = 0,001$  с, а постоянные времени регулятора оказались равными:  $T_6 = 0,1$  с,  $T_7 = 0,075$  с,  $T_{и1} = 0,045$  с у первого варианта электропривода (таблица 3.1) и  $T_6 = 0,51$  с,  $T_7 = 0,126$  с,  $T_{и2} = 0,011$  с у второго варианта (таблица 3.1).

На рисунке 3.19 представлена двухконтурная система управления углом  $\theta$ , реализованная в MATLAB Simulink, а на рисунке 3.20 ее амплитудные и фазовые частотные характеристики в разомкнутом состоянии для двух вариантов объекта управления.

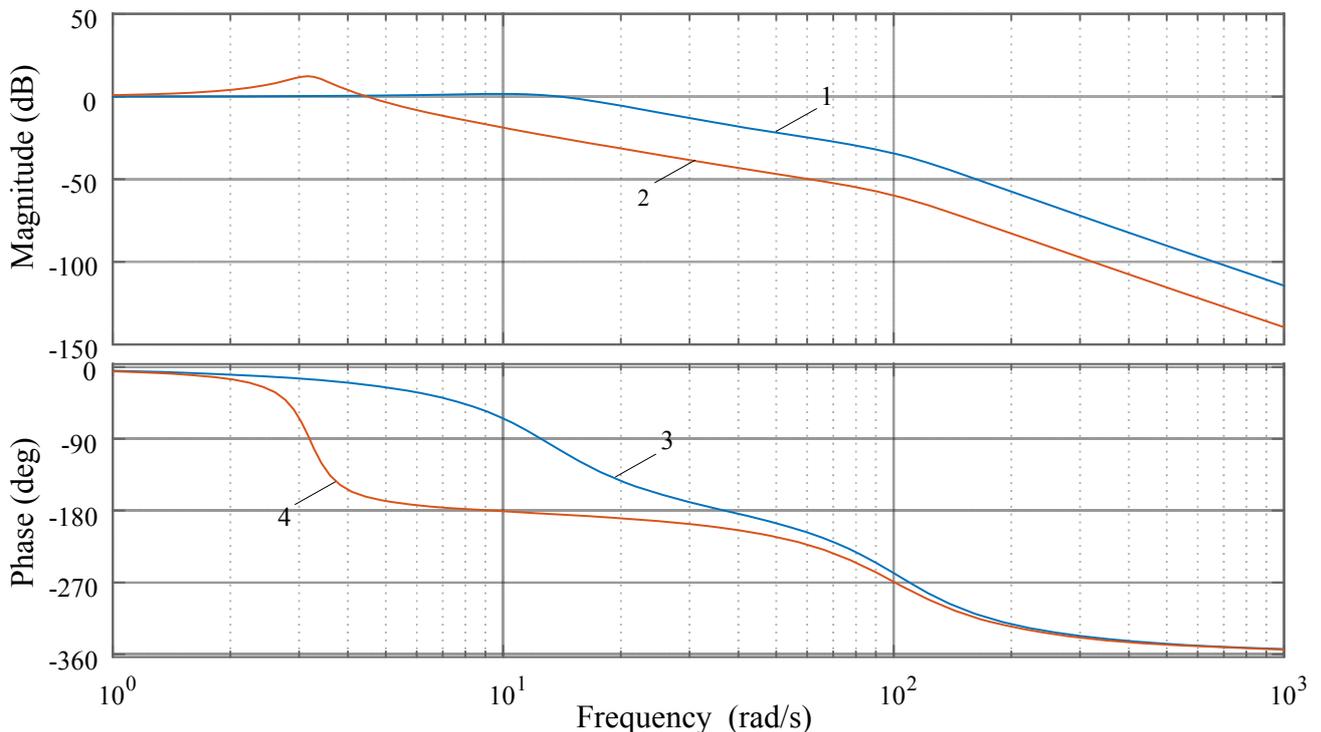


Рисунок 3.18 – Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики объекта управления (контур регулирования тока возбуждения замкнут, выход – датчик угла  $\theta$ ): 1, 3 – первый вариант ОУ; 2, 4 – второй вариант ОУ

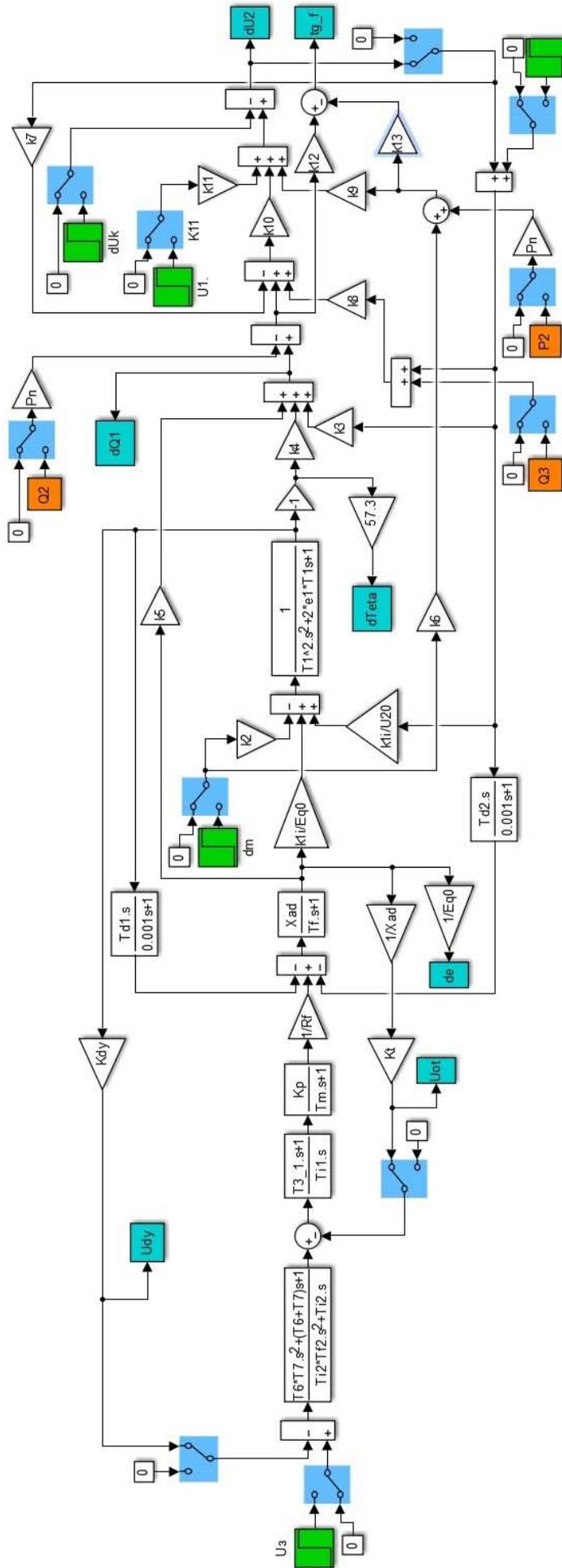


Рисунок 3.19 – Двухконтурная система управления углом  $\theta$ , реализованная в MATLAB Simulink

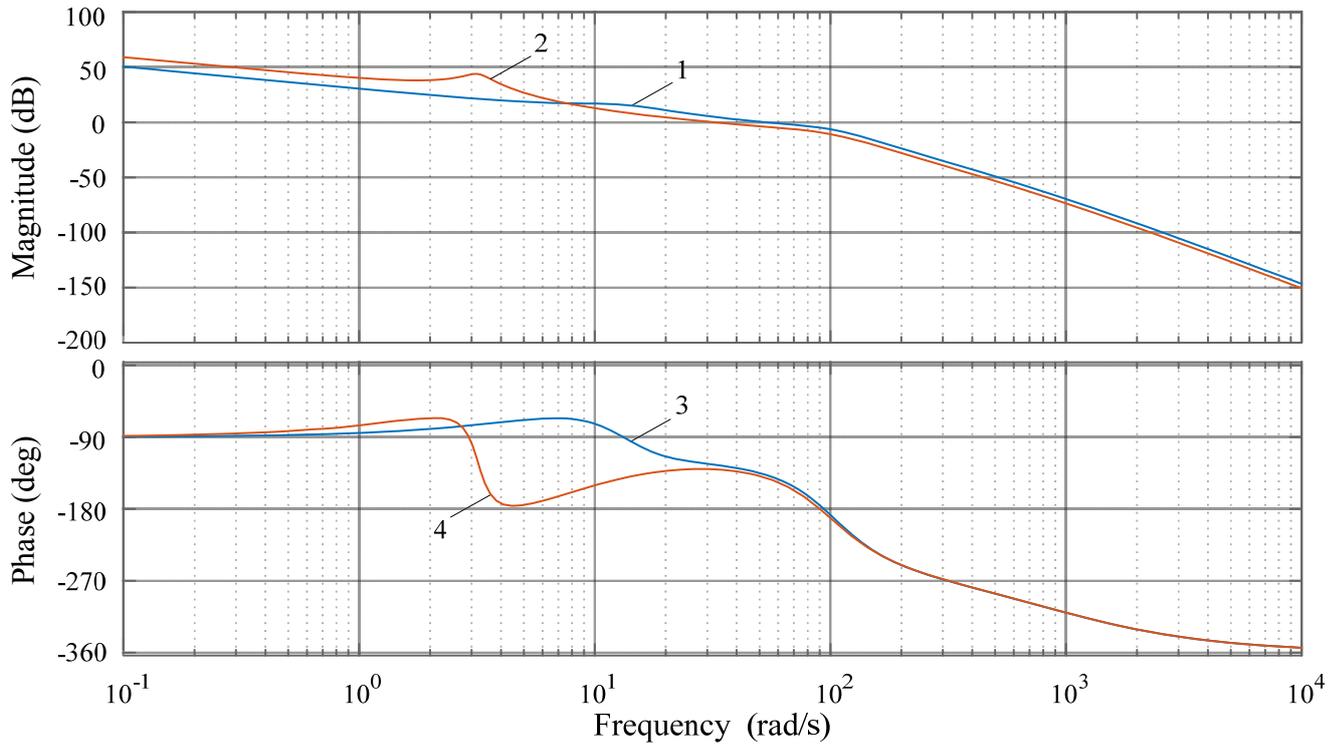
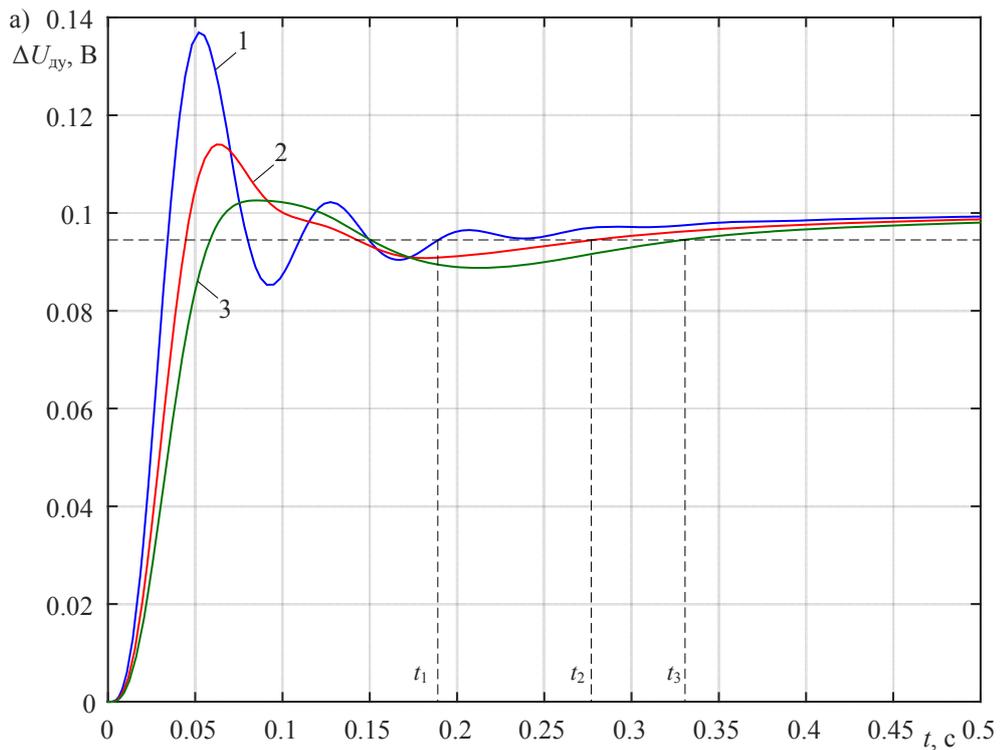


Рисунок 3.20 – Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики разомкнутого внешнего контура управления углом  $\theta$ : 1, 3 – первый вариант ОУ; 2, 4 – второй вариант ОУ

Переходные характеристики  $\Delta U_{\text{дв}}$  в двухконтурной системе управления углом  $\theta$  для двух вариантов объекта управления при различных значениях постоянной интегрирования регулятора  $T_{\text{и2}}$  представлены на рисунке 3.21.



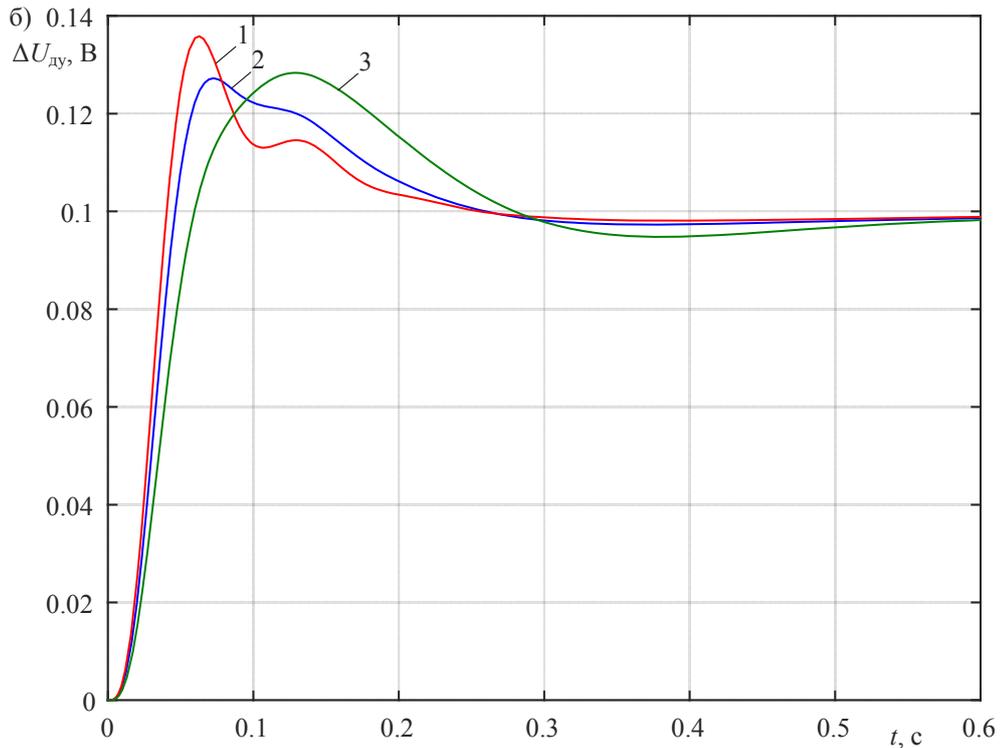
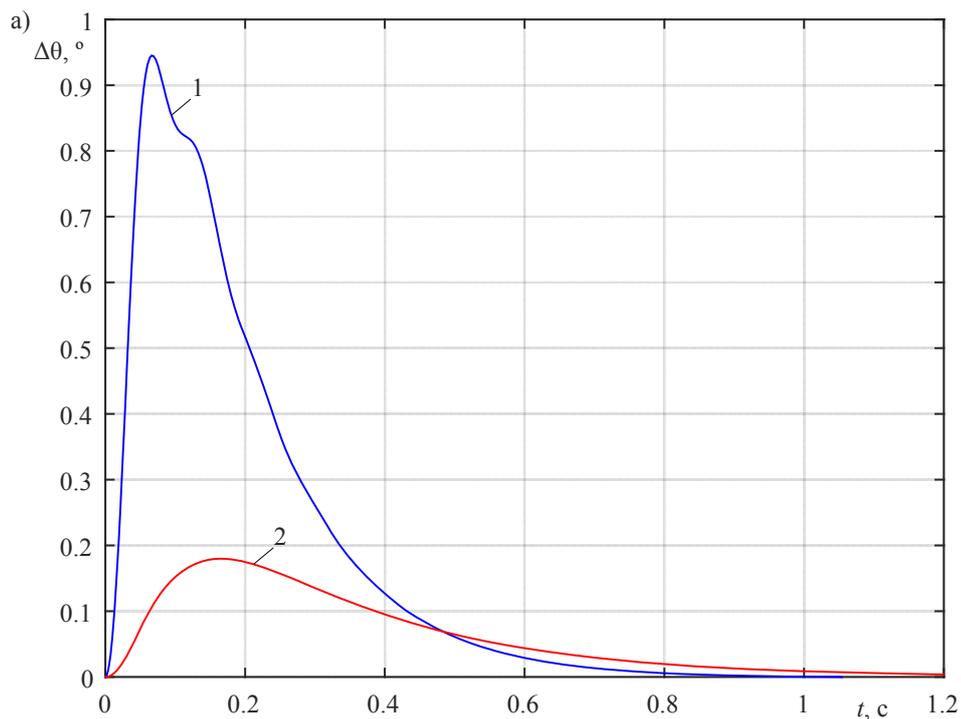


Рисунок 3.21 – Переходные характеристики  $\Delta U_{\text{дл}}$  при воздействии по  $\Delta U_3(t) = 0,1 \text{ В}$  в двухконтурной системе управления углом  $\theta$ : а) – первый вариант ОУ (1 –  $T_{\text{и}2} = 0,03 \text{ с}$ , 2 –  $T_{\text{и}2} = 0,045 \text{ с}$ , 3 –  $T_{\text{и}2} = 0,06 \text{ с}$ ); б) – второй вариант ОУ (1 –  $T_{\text{и}2} = 0,009 \text{ с}$ , 2 –  $T_{\text{и}2} = 0,011 \text{ с}$ , 3 –  $T_{\text{и}2} = 0,015 \text{ с}$ )

Переходные характеристики  $\Delta\theta(t)$ ,  $\Delta Q_1(t)$ ,  $\Delta e_q(t) = \Delta E_q(t)/\Delta E_{q0}$ ,  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  при воздействии  $\Delta m(t) = 0,1$  для двух вариантов объекта управления представлены на рисунке 3.22.



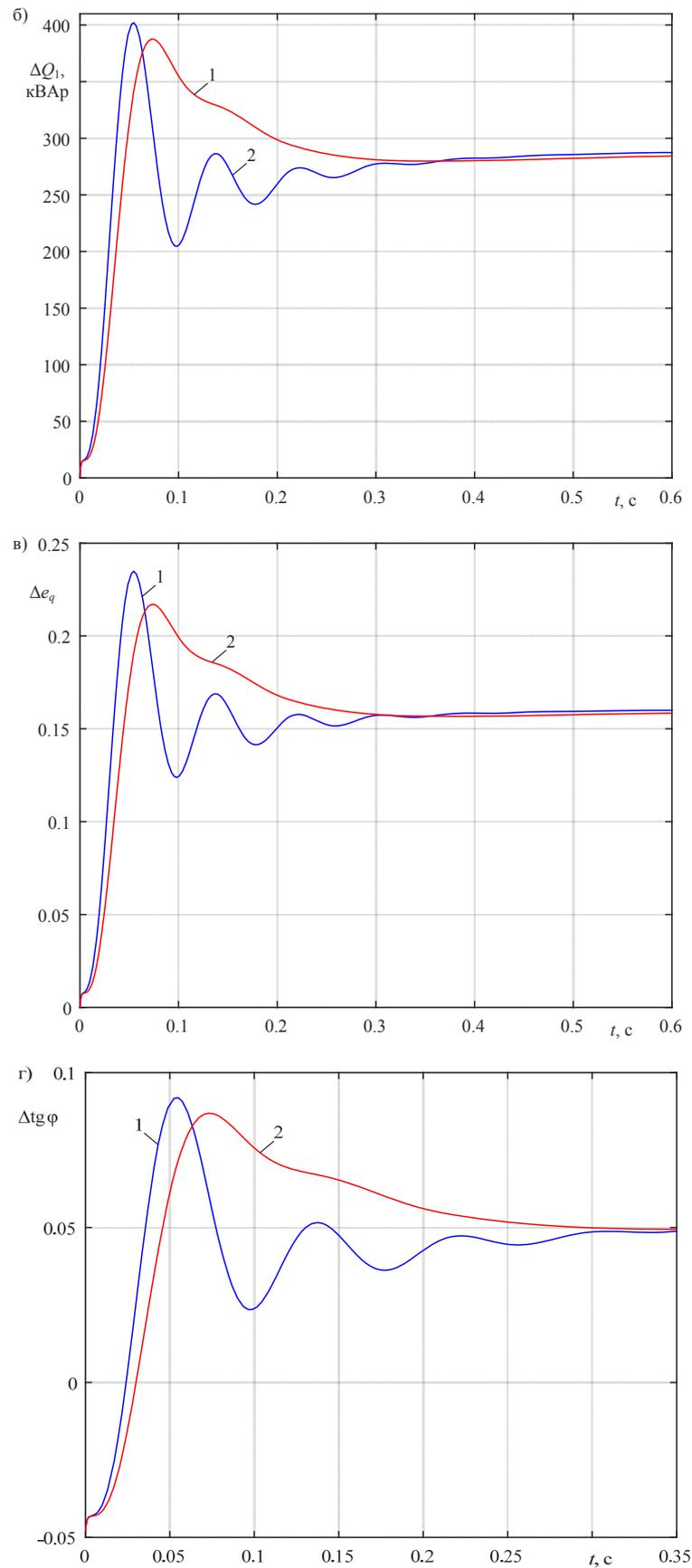
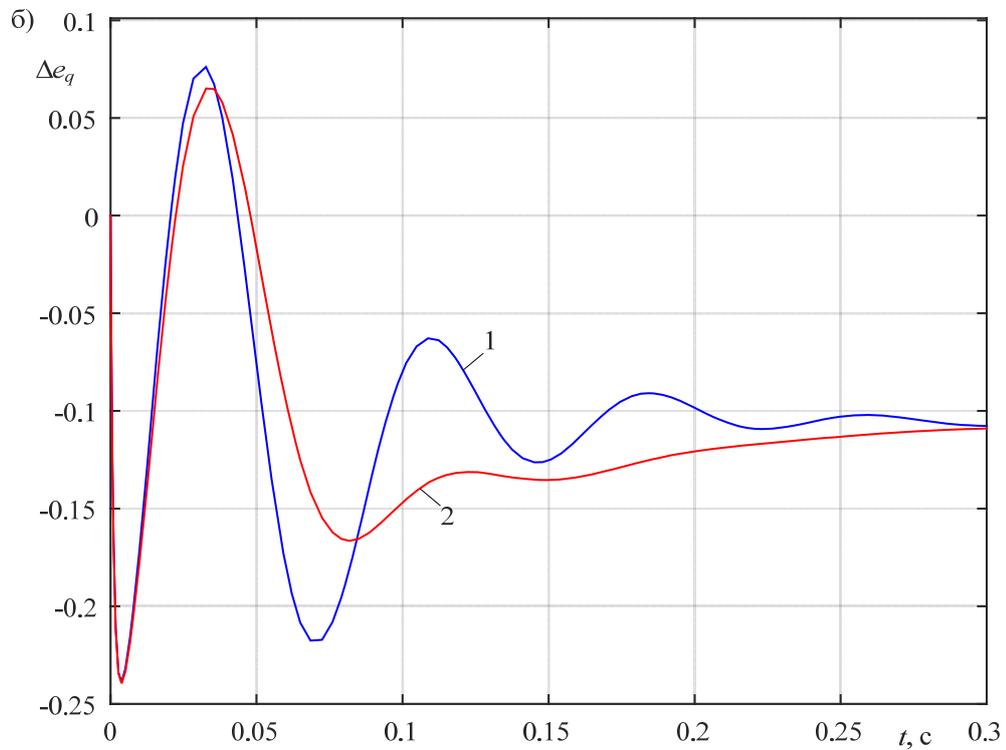
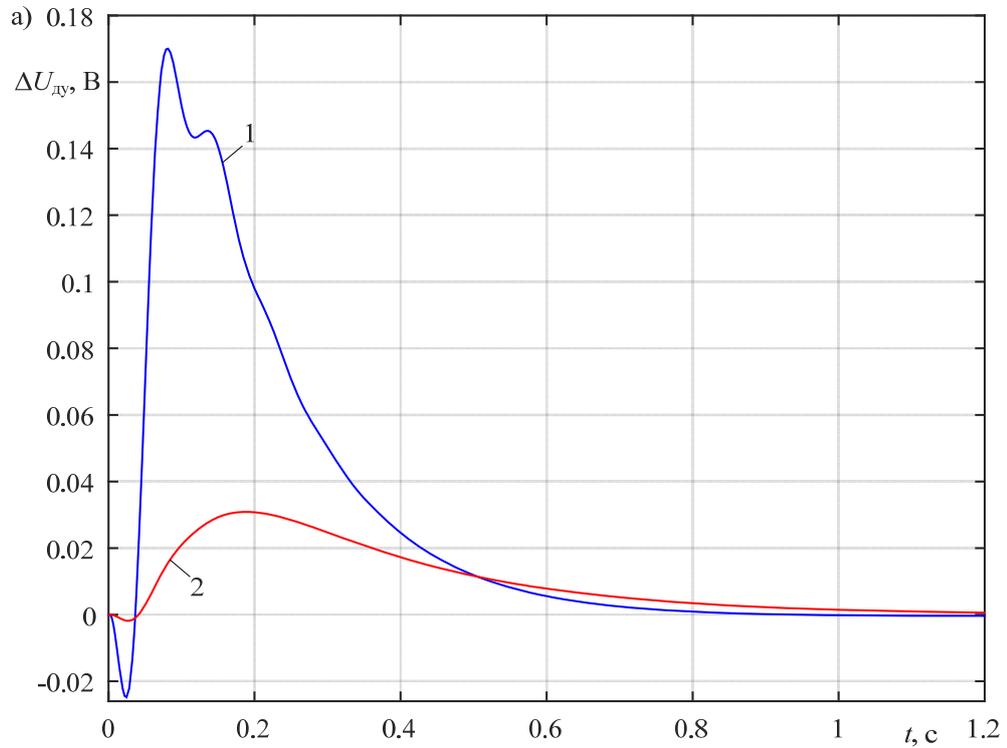


Рисунок 3.22 – Переходные характеристики в двухконтурной системе управления углом  $\theta$  при воздействии по  $\Delta m(t) = 0,1$  (1 – первый вариант  $T_{и2} = 0,03$  с, 2 – второй вариант  $T_{и2} = 0,009$  с) для выходных переменных: а) –  $\Delta \theta(t)$ ; б) –  $\Delta Q_1(t)$ ; в) –  $\Delta e_q(t) = \Delta E_q(t)/\Delta E_{q0}$ ; г) –  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$

Переходные характеристики  $\Delta U_{\text{дв}}(t)$ ,  $\Delta\theta(t)$ ,  $\Delta e_q(t) = \Delta E_q(t)/\Delta E_{q0}$ ,  $\Delta Q_1(t)$ ,  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  при изменении напряжения в сети  $\Delta U_2(t) = 600 \text{ В}$  для двух вариантов объекта управления представлены на рисунке 3.23.



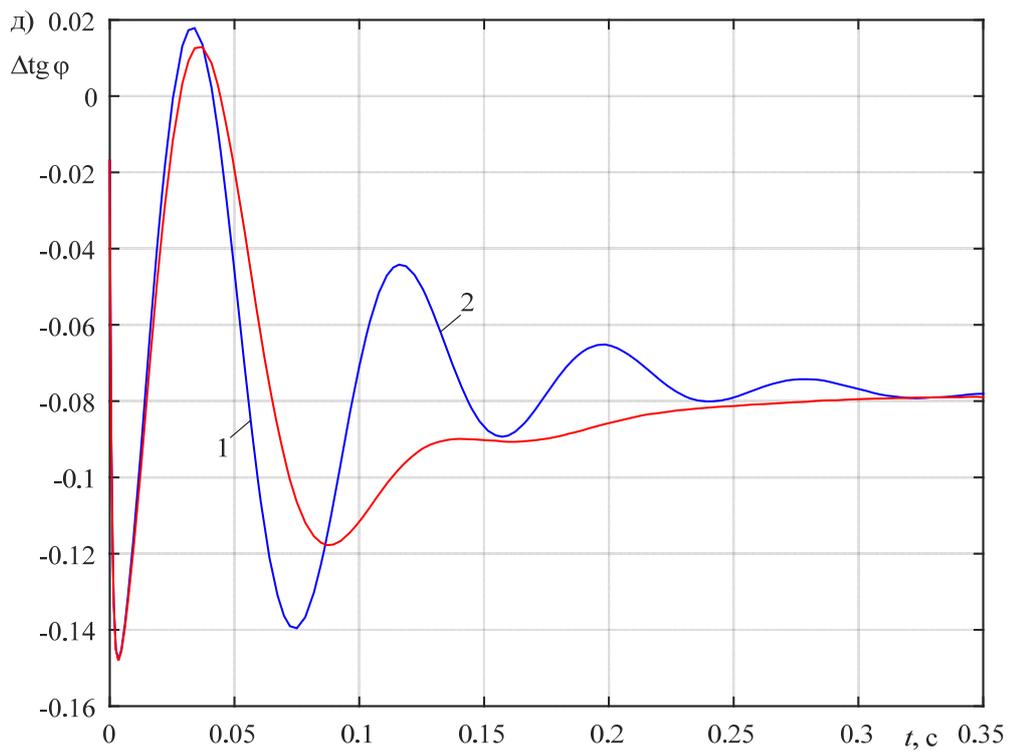
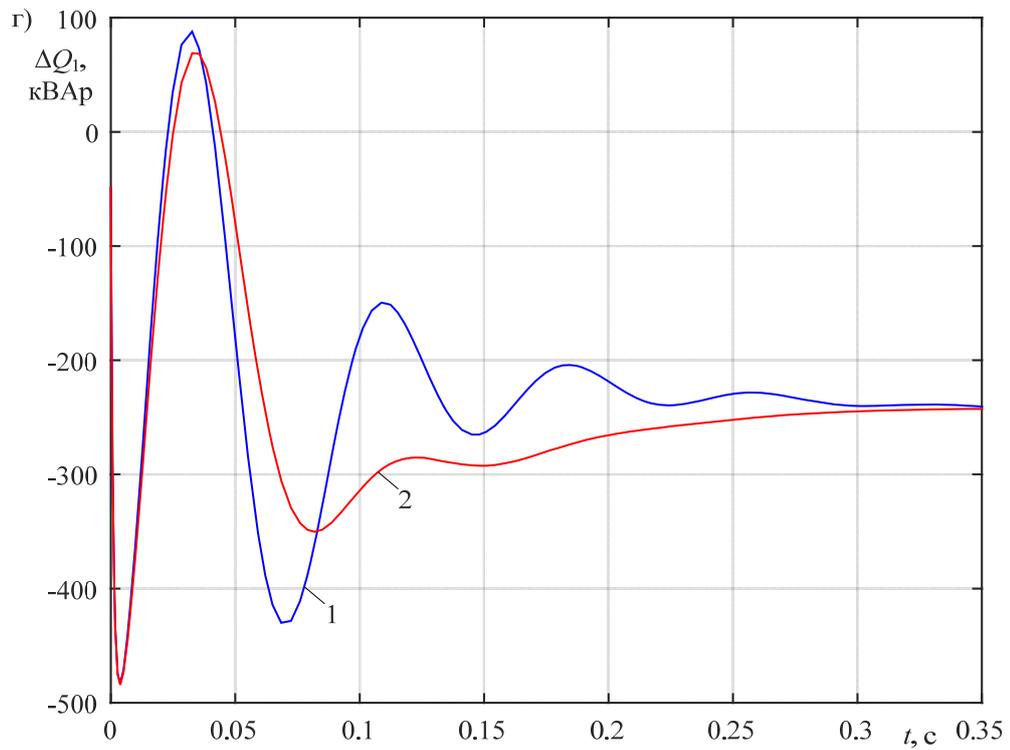


Рисунок 3.23 – Переходные характеристики в двухконтурной системе управления углом  $\theta$  при изменении напряжения в сети  $\Delta U_2(t) = 600 \text{ В}$  (1 – первый вариант, 2 – второй вариант) для выходных переменных: а) –  $\Delta U_{\text{дв}}(t)$ ; б) –  $\Delta e_q(t)$ ; в) –  $\Delta Q_1(t)$ ; г) –  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$

Передаточные функции регуляторов, их параметры, время регулирования  $t_{p1}$ , перерегулирования  $\sigma$  по управляющему воздействию  $\Delta U_{3y}(t) = 0,1 \text{ В}$ , а также время регулирования  $t_{p2}$ , величина динамического провала угла  $\Delta\theta_{\max}$  при изменении нагрузки  $\Delta m(t) = 0,1$  для двух вариантов объекта управления в одноконтурном и двухконтурном вариантах системы АРВ синхронного двигателя приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Число контуров	Вариант ОУ	Передаточные функции и показатели качества						
		$W_{pt}(p)$	$W_{py}(p)$		$t_{p1}, \text{ с}$	$\sigma, \%$	$t_{p2}, \text{ с}$	$\Delta\theta_{\max}, ^\circ$
Один	№1	1	$\frac{(T_6 p + 1)^2 (T_7 p + 1)}{T_{\text{и}} p (T_{\phi} p + 1)^2}$	$T_{\text{и}} = 10^{-3} \text{ с}$ $T_6 = 0,064 \text{ с}$ $T_7 = 0,1 \text{ с}$	0,17	40	0,07	0,37
	№2	1	$T_{\phi} = 10^{-3} \text{ с}$	$T_{\text{и}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ $T_6 = 0,1 \text{ с}$ $T_7 = 0,075 \text{ с}$	0,07	30	0,25	0,25
Два	№1	$\frac{0,97 p + 1}{0,01 p}$	$\frac{(T_6 p + 1)(T_7 p + 1)}{T_{\text{и}} p (T_{\phi} p + 1)}$	$T_{\text{и}} = 0,03 \text{ с}$ $T_6 = 0,1 \text{ с}$ $T_7 = 0,075 \text{ с}$	0,2	37	0,45	0,95
	№2	$\frac{0,91 p + 1}{0,01 p}$	$T_{\phi} = 10^{-3} \text{ с}$	$T_{\text{и}} = 0,009 \text{ с}$ $T_6 = 0,51 \text{ с}$ $T_7 = 0,126 \text{ с}$	0,23	36	0,45	0,18

Из анализа данных этой таблицы следует, что при отработке возмущений, например по  $\Delta m(t)$ , с наибольшей быстротой (электроприводы с ударной нагрузкой) систему АРВ с отрицательной обратной связью следует конструировать по одноконтурному варианту. В остальных случаях, где не требуется высокого быстродействия, необходимо ориентироваться на двухконтурные системы, у которых показатели качества достаточно хорошие, а регуляторы контуров имеют более простую структуру; внутренний контур регулирования имеет ПИ-регулятор, а внешний – ПИД-регулятор.

Время регулирования внутреннего угла  $t_{p2}$  (таблица 3.2) в одноконтурной системе меньше, а в двухконтурной системе соизмеримо с временем регулирования  $t_{p2} = 0,3 \div 0,4$  [83].

При выборе алгоритма управления системы АРВ двигателя следует также иметь в виду, что в системе с обратной связью по внутреннему углу машины отклонение реактивной мощности в установившемся режиме при колебании напряжения сети значительно больше (рисунок 3.15г) по сравнению с системой без обратной связи (рисунки 2.25, 2.26).

Объясняется это тем, что в первом случае двигатель работает с постоянным углом нагрузки  $\theta = \text{const}$  и постоянной нагрузкой  $P_c = \text{const}$ . Поэтому, например, при увеличении  $U_c$  происходит уменьшение  $E_q$ , что следует из уравнения [12]

$$\frac{E_q U_c}{x_d} \sin \theta = P_c.$$

А при уменьшении  $E_q$  реактивная мощность уменьшается в установившемся режиме на величину  $\Delta Q_1 = k_5 \Delta E_q$ . При увеличении напряжения на  $\Delta U_2(t) = 600$  В приращение мощности (рисунки 3.16, 3.23)  $\Delta Q_1 = -240$  кВАр, а  $\Delta \text{tg } \varphi = -0,08$ , а при уменьшении напряжения на эту величину  $-\Delta \text{tg } \varphi = 0,08$ .

Максимальное значение КРМ УН составляет

$$\Delta \text{tg } \varphi_{\max} = 0,08 + 0,18 = 0,26.$$

### **3.4 Синхронный электропривод с обратной связью по реактивной мощности синхронного двигателя**

Структурная схема одноконтурной системы управления с обратной связью по реактивной мощности двигателя [55, 57] представлена на рисунке 3.24.

Одноконтурная система управления реактивной мощностью двигателя, реализованная в MATLAB Simulink, представлена на рисунке 3.25.

Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура, состоящего из тиристорного преобразователя, синхронного двигателя с выходной величиной реактивной мощностью и датчика мощности представлены на рисунке 3.26.

Регулятор мощности выбран из условия настройки системы по условиям модульного оптимума. Его передаточная величина

$$W_{\text{рм}}(p) = \frac{T_3 p + 1}{T_{\text{и2}} p}$$

Частотные характеристики разомкнутого контура управления реактивной мощностью двигателя представлены на рисунке 3.27.

Переходные характеристики замкнутой системы по воздействию  $\Delta U_{\text{зм}} = 0,1(t)$  В представлены на рисунке 3.28. Из которых следует, что наилучшими по критерию наилучшего затухания переходного процесса при  $\sigma \leq 10\%$  являются переходные процессы при  $T_{\text{и2}} = 0,02$  с.

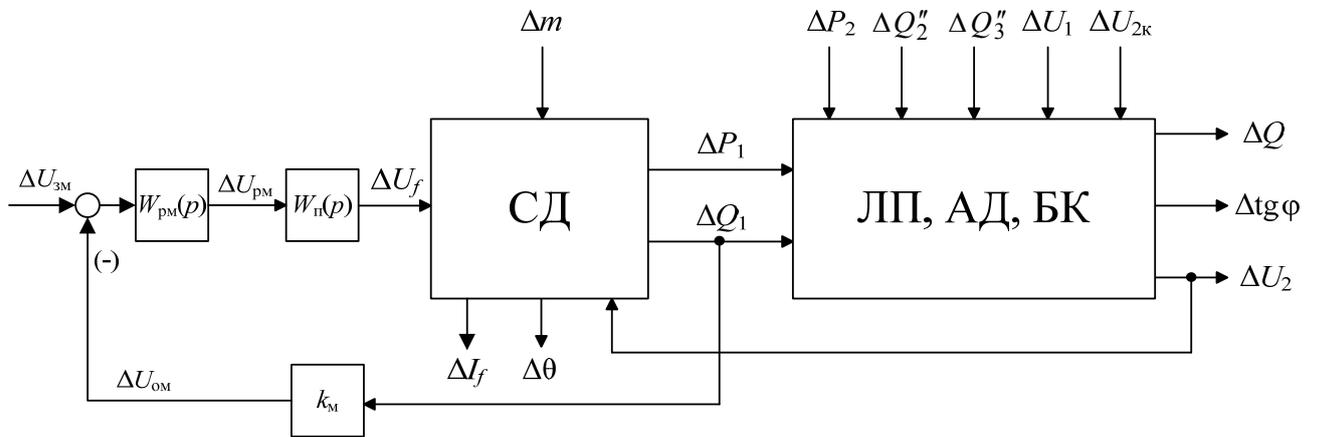


Рисунок 3.24 – Структурная схема электропривода с обратной связью по  $\Delta Q_1$

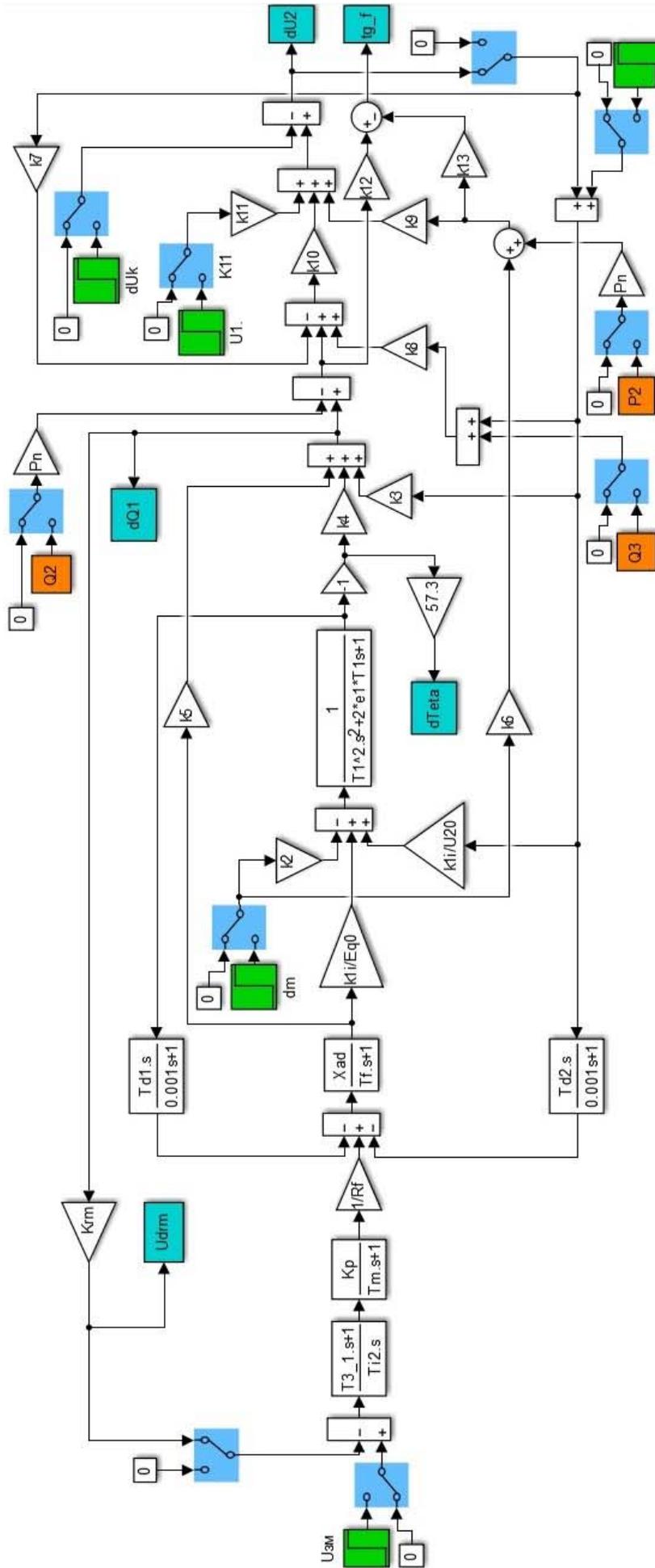


Рисунок 3.25 – Одноконтурная система управления КРМ с обратной связью по реактивной мощности двигателя, реализованная в MATLAB Simulink

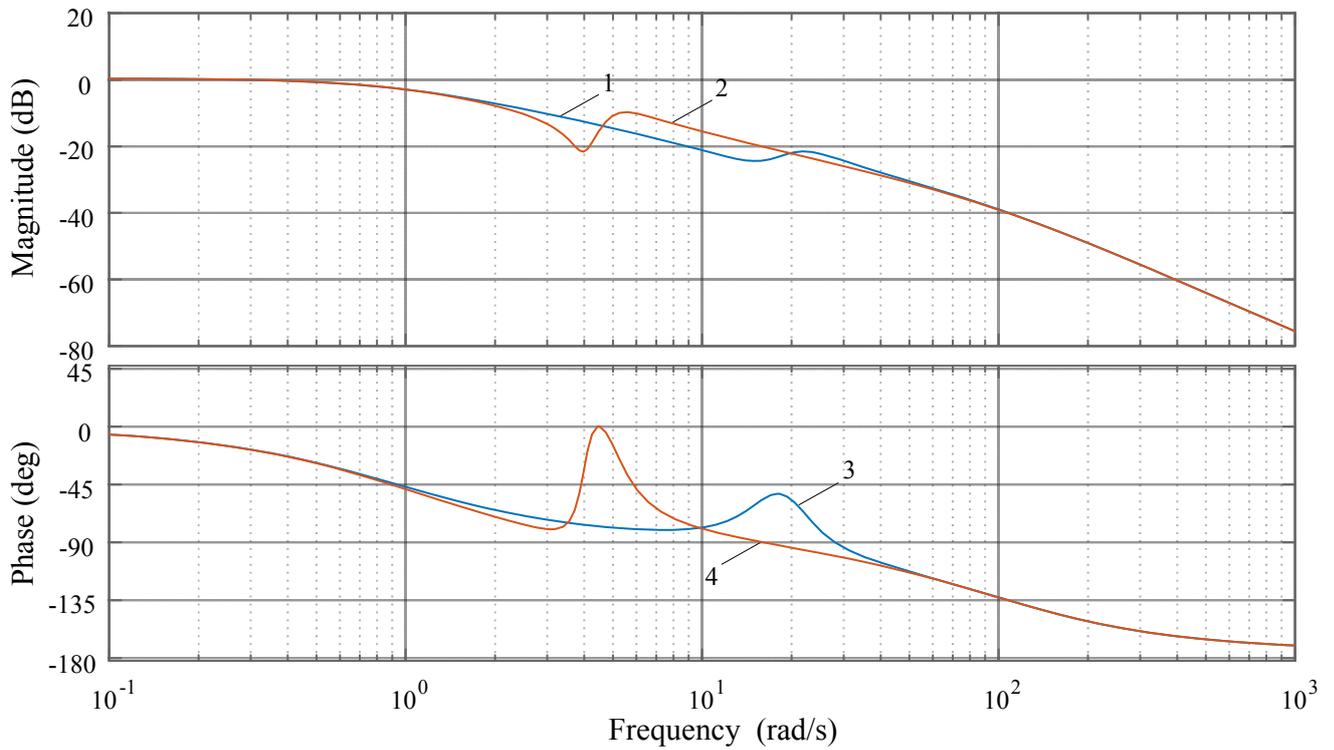


Рисунок 3.26 – Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики объекта управления (тиристорный преобразователь, синхронный двигатель, датчик реактивной мощности): 1, 3 – первый вариант ОУ; 2, 4 – второй вариант ОУ

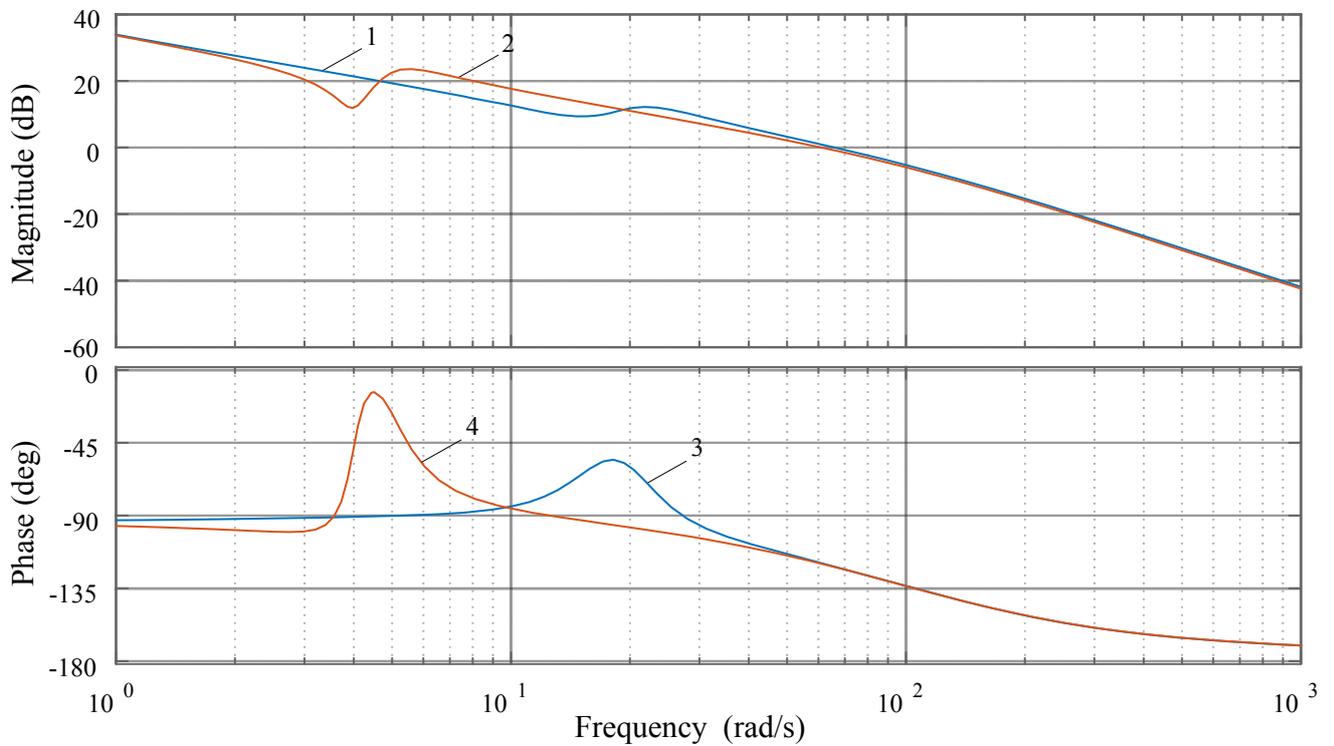


Рисунок 3.27 – Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики разомкнутого контура управления реактивной мощностью  $Q_1$ : 1, 3 – первый вариант ОУ; 2, 4 – второй вариант ОУ

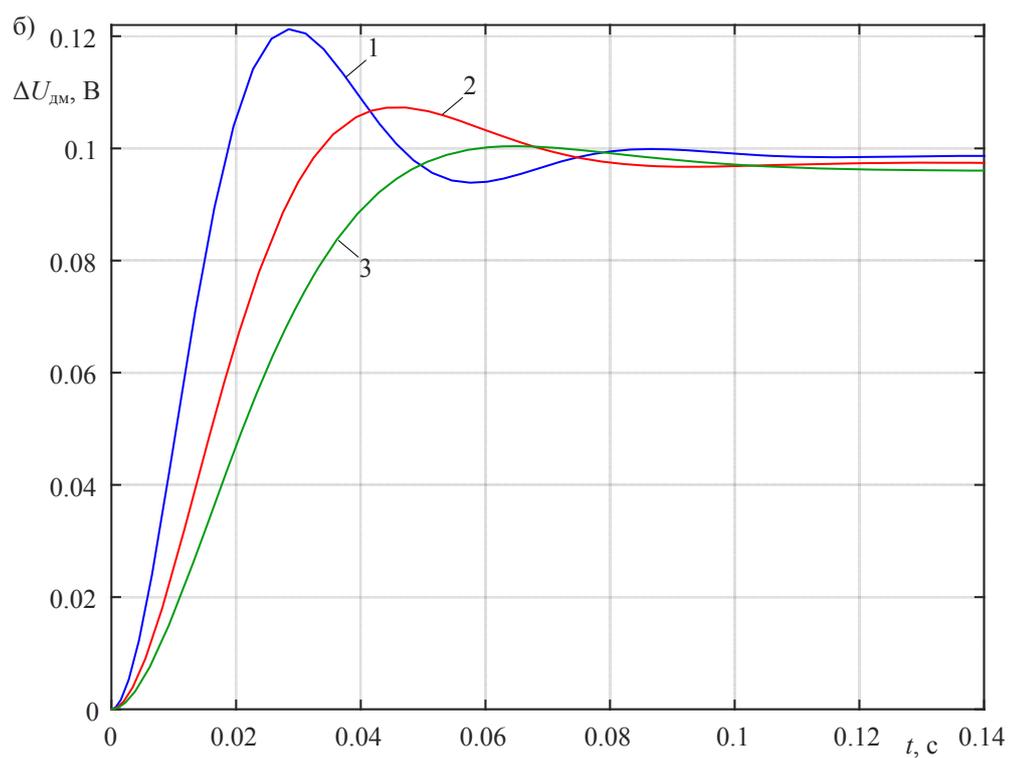
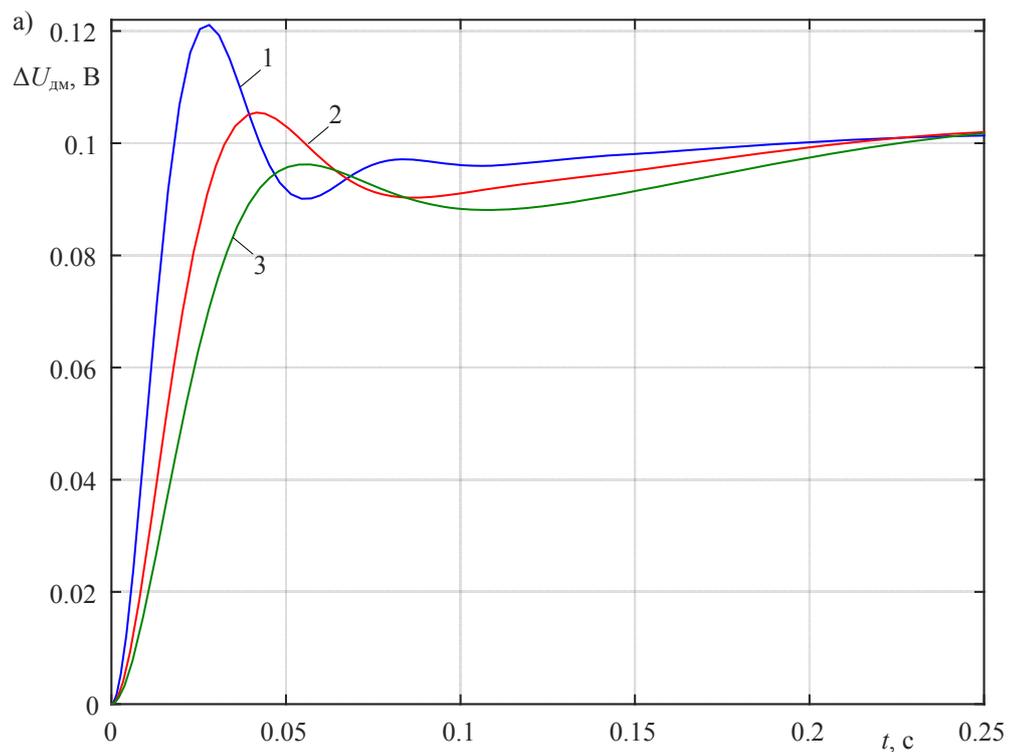


Рисунок 3.28 – Переходные характеристики  $\Delta U_{\text{дм}}$  при воздействии по  $\Delta U_3(t) = 0,1$  В в замкнутом контуре управления реактивной мощностью  $Q_1$ : а) – первый вариант ОУ (1 –  $T_{и2} = 0,01$  с, 2 –  $T_{и2} = 0,02$  с, 3 –  $T_{и2} = 0,03$  с); б) – второй вариант ОУ (1 –  $T_{и2} = 0,01$  с, 2 –  $T_{и2} = 0,02$  с, 3 –  $T_{и2} = 0,03$  с)

Переходные характеристики по управляющему воздействию  $\Delta U_3(t) = 0,1 \text{ В}$  для выходной переменной  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  при  $T_{и2} = 0,01$  (первый вариант ОУ) и  $T_{и2} = 0,03$  (второй вариант ОУ) представлены на рисунке 3.29.

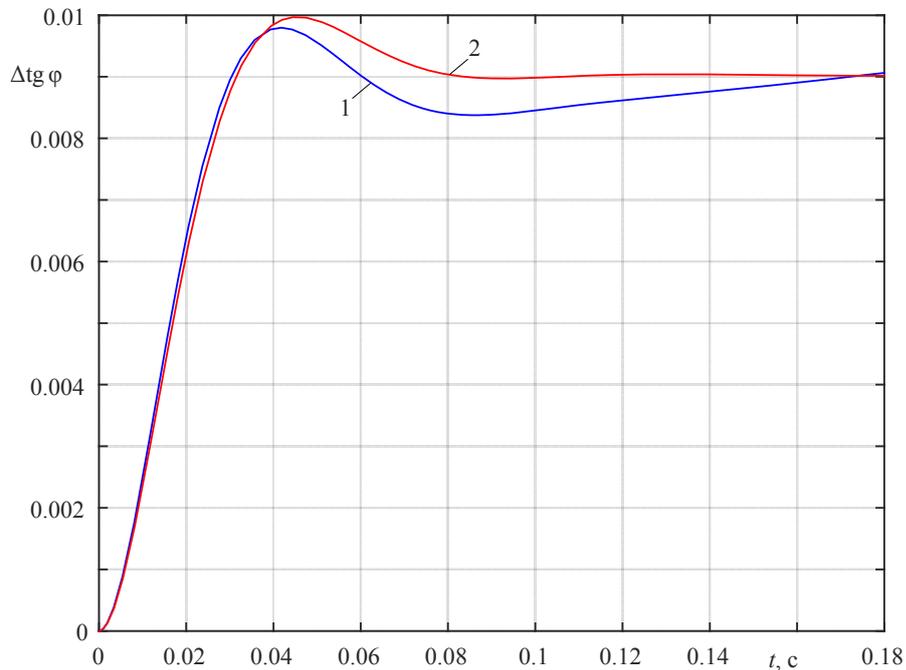
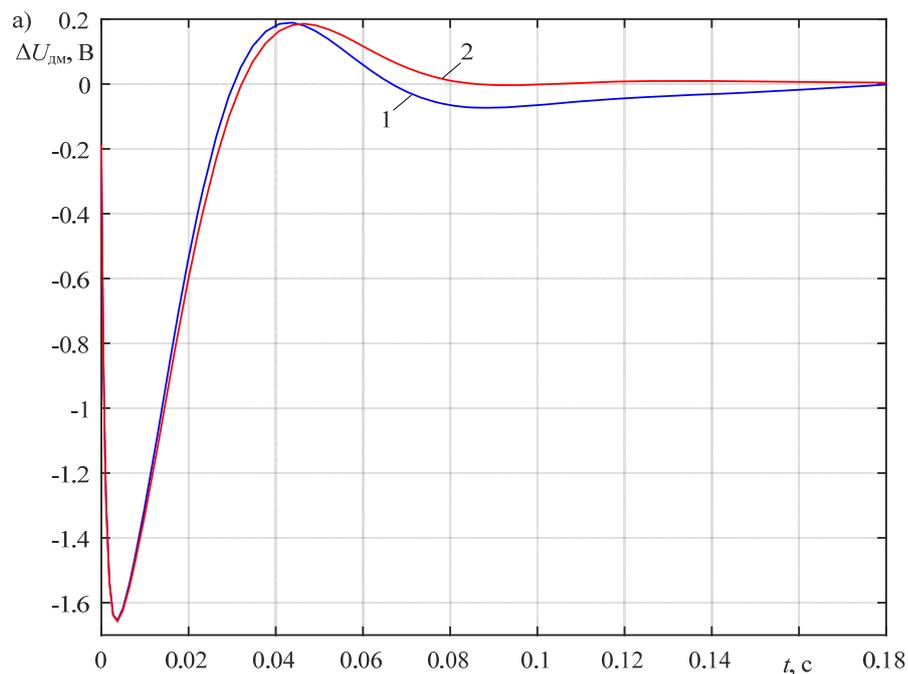


Рисунок 3.29 – Переходные характеристики  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  в контуре управления реактивной мощностью  $Q_1$  при воздействии по  $\Delta U_3(t) = 0,1 \text{ В}$ : 1 – первый вариант, 2 – второй вариант

Переходные характеристики  $\Delta U_{дм}(t)$ ,  $\Delta Q_1(t)$ ,  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  при изменении напряжения в сети  $\Delta U_2(t) = 600 \text{ В}$  для двух вариантов объекта управления представлены на рисунке 3.30.



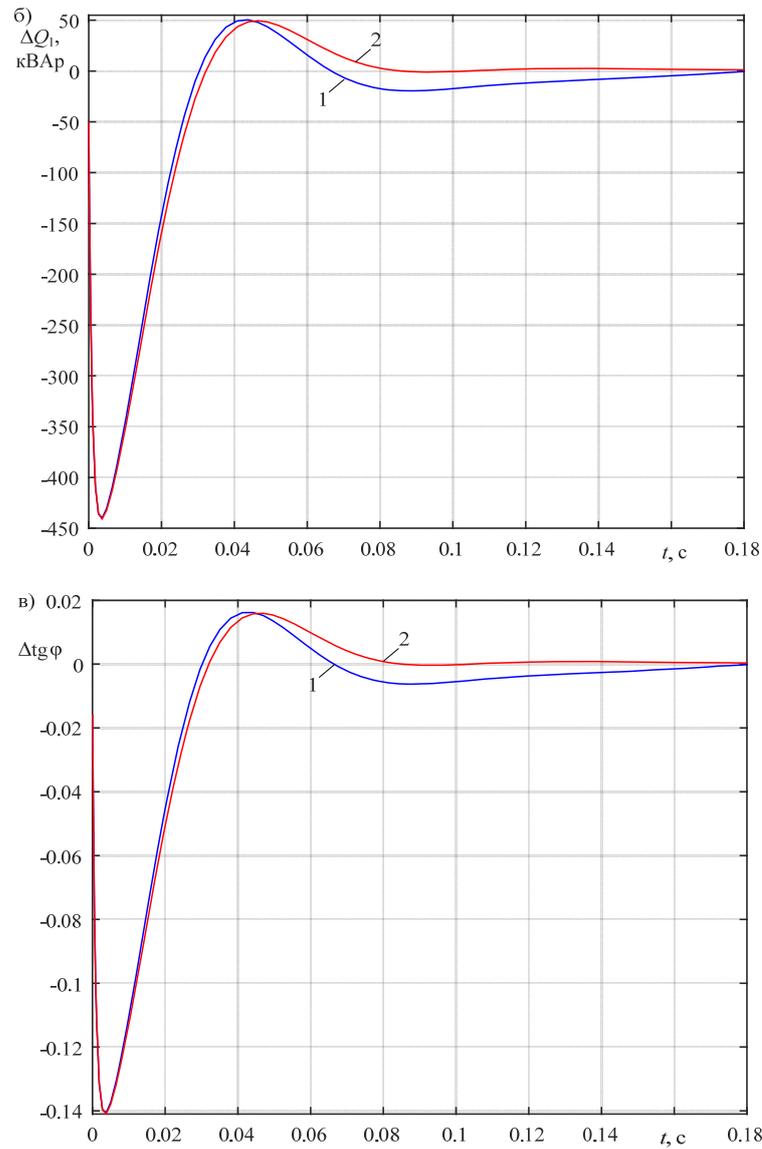


Рисунок 3.30 – Переходные характеристики в одноконтурной системе управления реактивной мощностью  $Q_1$  при изменении напряжения в сети  $\Delta U_2(t) = 600$  В (1 – первый вариант, 2 – второй вариант) для выходных переменных: а) –  $\Delta U_{\text{дм}}(t)$ ; б) –  $\Delta Q_1(t)$ ; в) –  $\Delta \text{tg} \varphi(t)$

### 3.5 Синхронный электропривод с обратными связями по току возбуждения и реактивной мощности двигателя

Структурная схема двухконтурной системы управления реактивной мощностью синхронного двигателя [55, 57] представлена на рисунке 3.31. Двухконтурная система управления реактивной мощностью  $Q_1$  в MATLAB Simulink представлена на рисунке 3.32.

Логарифмические частотные характеристики разомкнутого внешнего контура без регулятора мощности для двух вариантов объекта управления представлены на рисунке 3.33. Из которых следует, что в диапазоне до ожидаемой частоты среза разомкнутой системы объект управления можно аппроксимировать передаточной функцией

$$W_{\text{оу}}(p) = \frac{1}{(T_{\mu}p + 1)(1,58T_{\mu}p + 1)}.$$

Тогда при настройке внешнего контура по условиям модульного оптимума получаем регулятор мощности с передаточной функцией

$$W_{\text{рм}}(p) = \frac{1,58T_{\mu}p + 1}{T_{\text{и2}}p}.$$

Логарифмические частотные характеристики разомкнутой двухконтурной системы управления реактивной мощностью  $Q_1$  представлены на рисунке 3.34, а ее переходные характеристики  $\Delta U_{\text{дм}}(t)$  по задающему воздействию  $\Delta U_{\text{зм}}(t) = 0,1$  В для двух вариантов объекта управления и разных значений постоянной интегрирования регулятора мощности  $T_{\text{и2}}$  – на рисунке 3.35.

Из переходных характеристик (рисунок 3.35) следует, что наилучшими переходными характеристиками для обоих вариантов объекта управления являются характеристики при постоянной интегрирования  $T_{\text{и2}} = 0,01$  с.

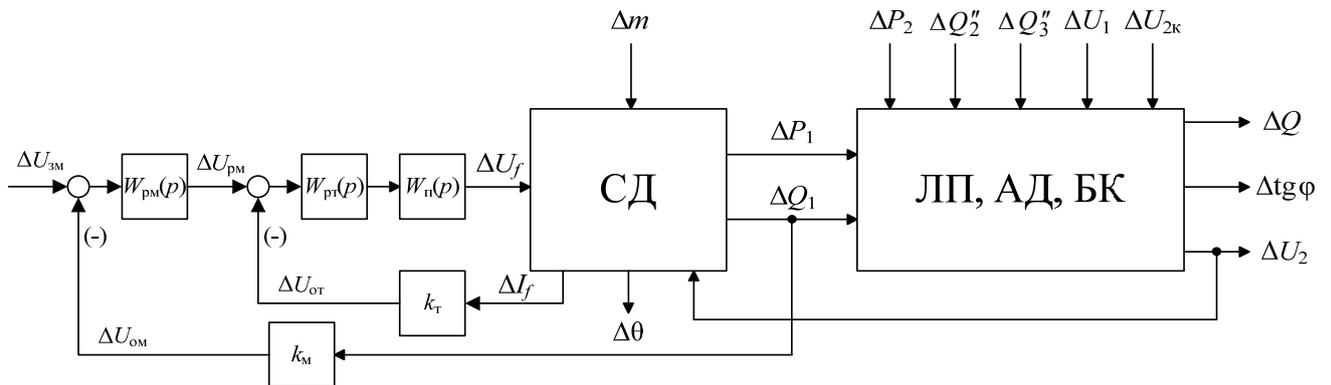


Рисунок 3.31 – Структурная схема электропривода с обратными связями по  $\Delta I_f$  и  $\Delta Q_1$

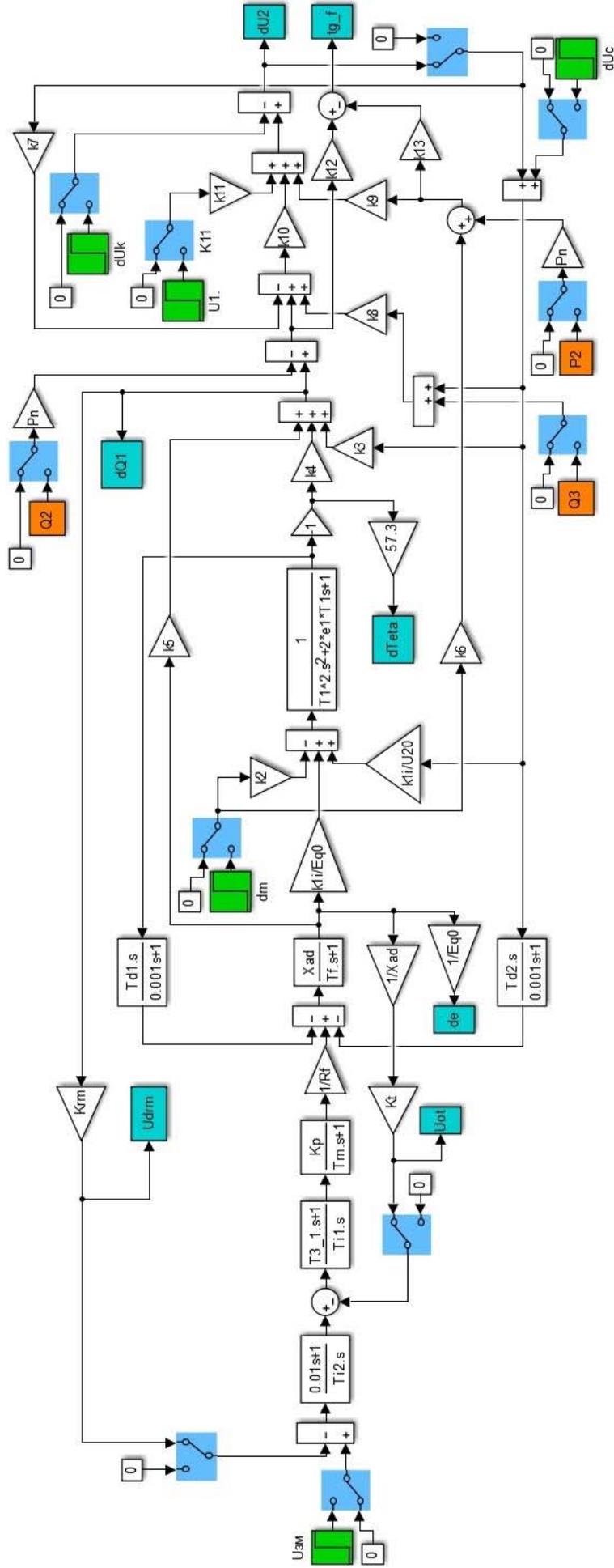


Рисунок 3.32 – Двухконтурная система автоматического управления реактивно мощностью  $Q_1$ , реализованная в MATLAB Simulink

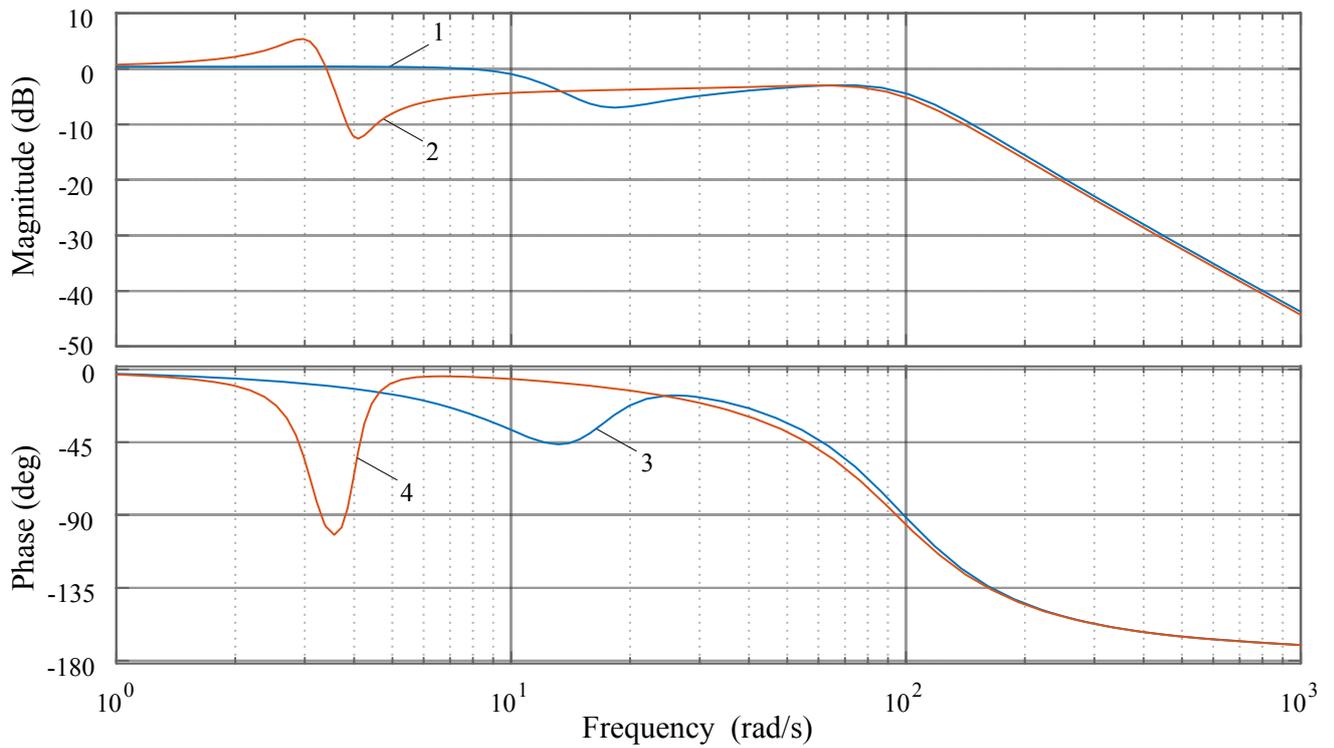


Рисунок 3.33 – Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики объекта управления с внутренним контуром регулирования тока возбуждения (без регулятора реактивной мощности): 1, 3 – первый вариант ОУ; 2, 4 – второй вариант ОУ

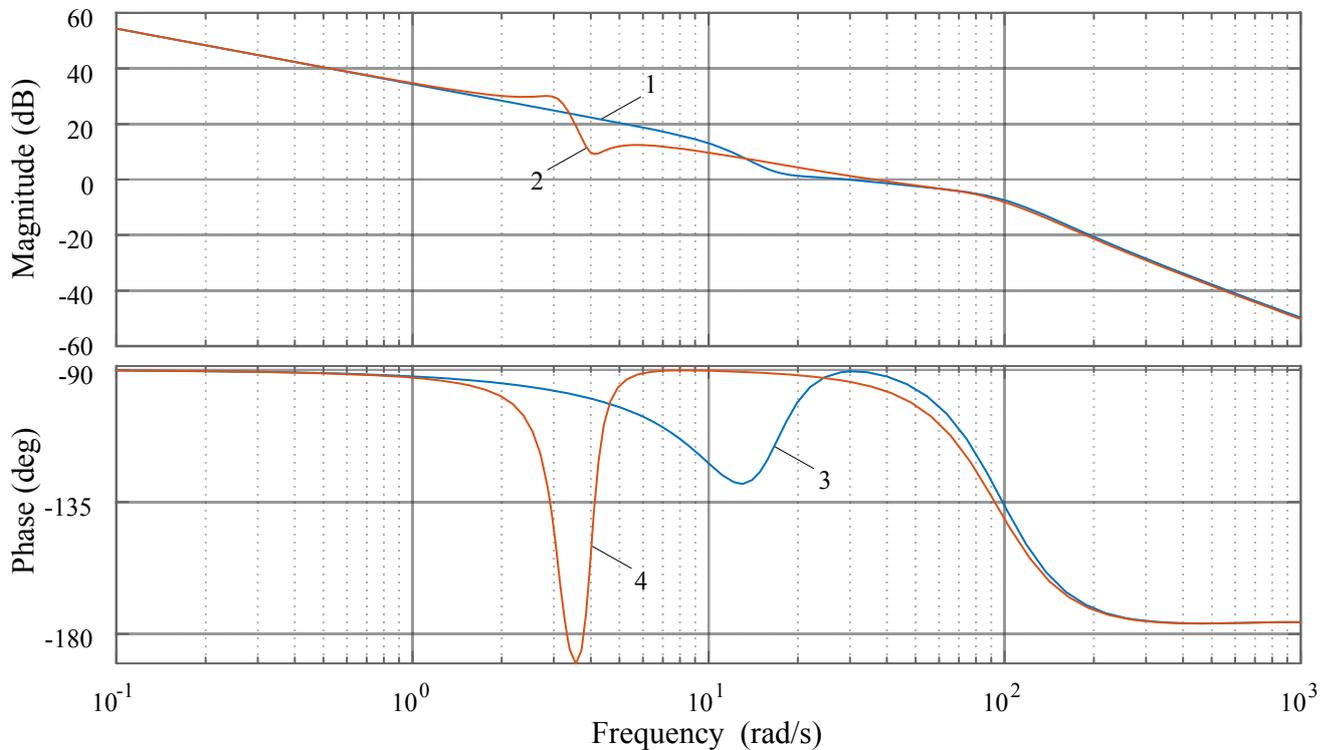


Рисунок 3.34 – Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики разомкнутой двухконтурной системы управления реактивной мощностью  $Q_1$ :

1, 3 – первый вариант ОУ; 2, 4 – второй вариант ОУ

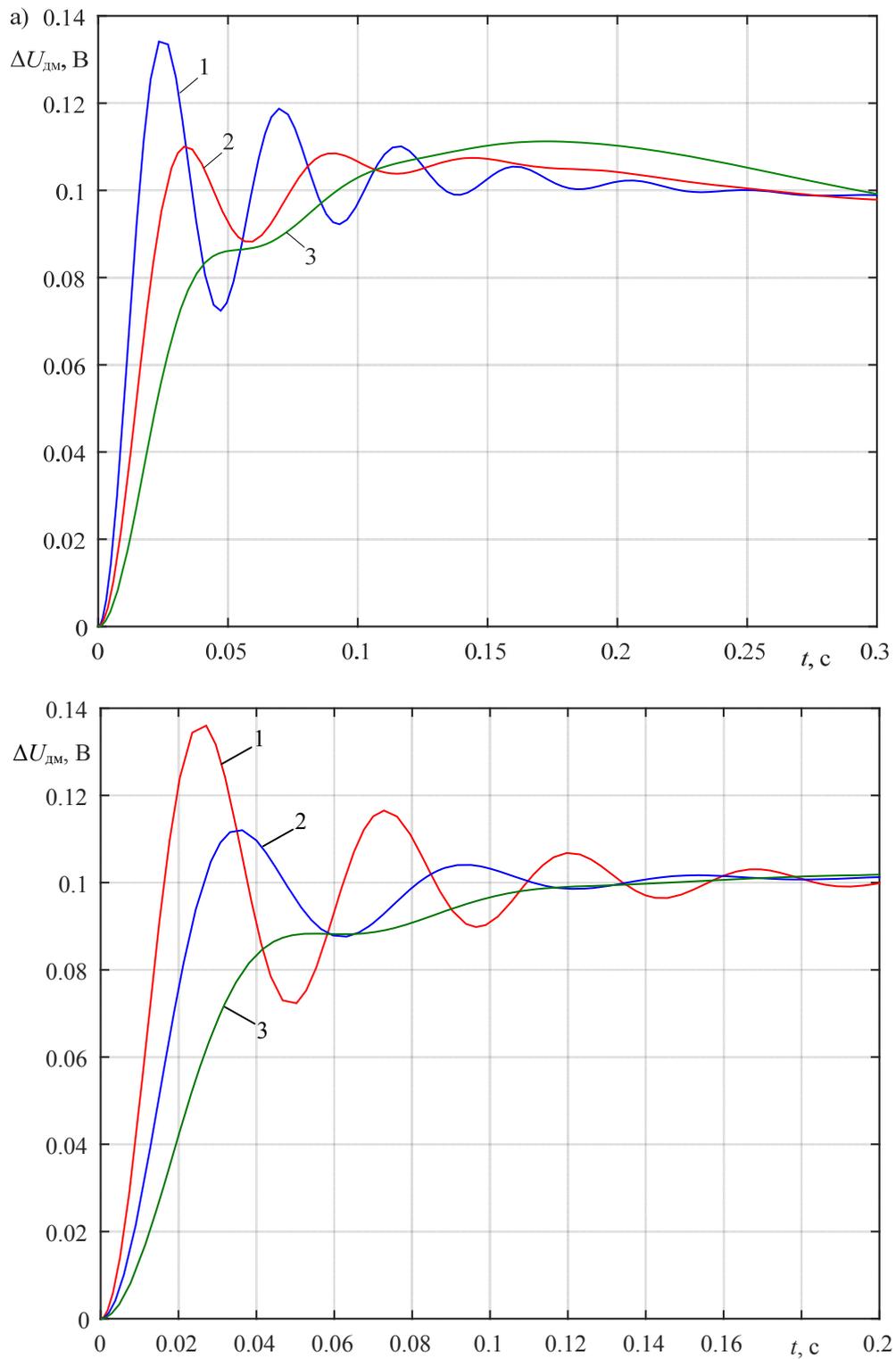
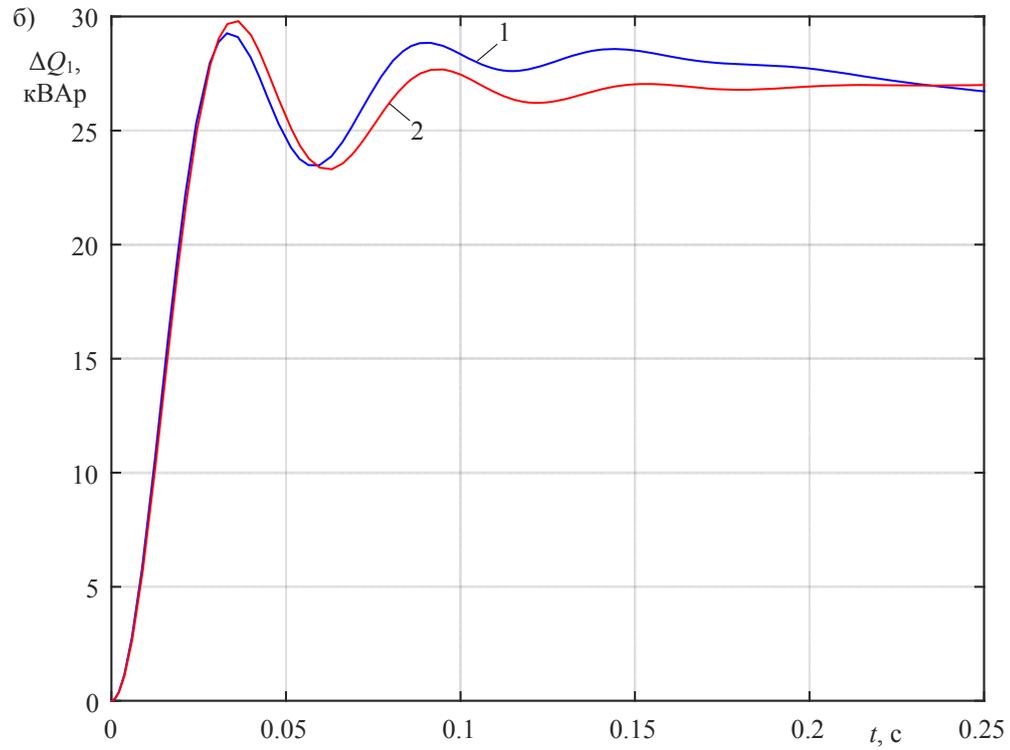
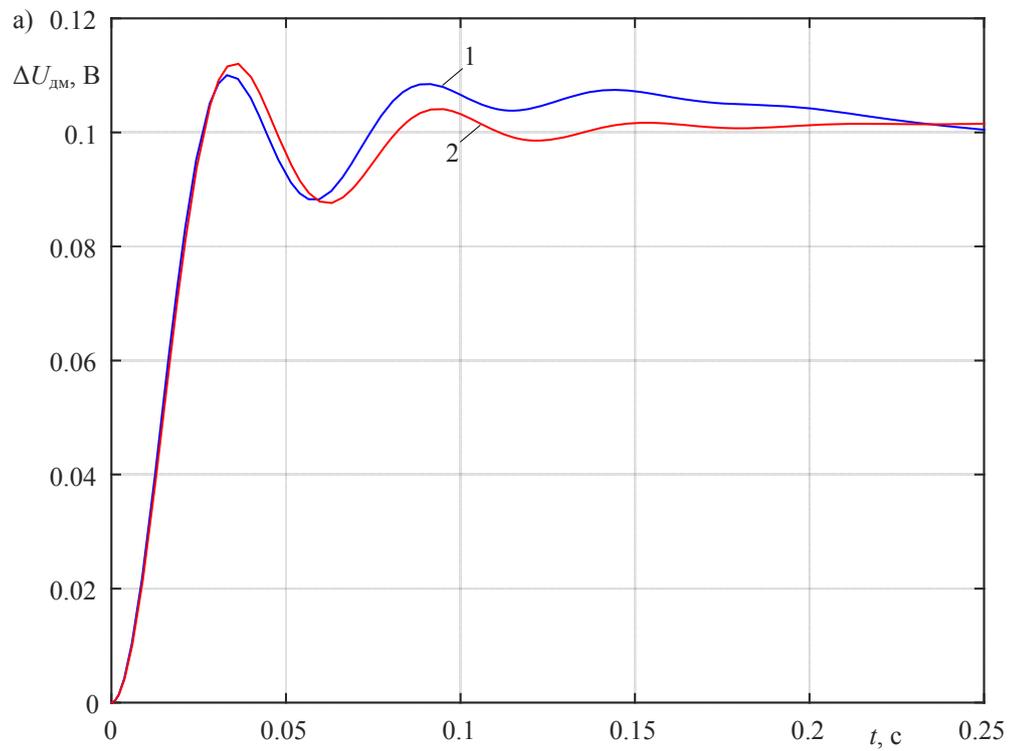


Рисунок 3.35 – Переходные характеристики  $\Delta U_{\Delta M}$  при воздействии по  $\Delta U_3 = 0,1(t)$  В в двухконтурной системе управления реактивной мощностью  $Q_1$ : а) – первый вариант ОУ ( $1 - T_{и2} = 0,005$  с,  $2 - T_{и2} = 0,01$  с,  $3 - T_{и2} = 0,02$  с); б) – второй вариант ОУ ( $1 - T_{и2} = 0,005$  с,  $2 - T_{и2} = 0,01$  с,  $3 - T_{и2} = 0,02$  с)

Переходные характеристики  $\Delta U_{\text{дм}}(t)$ ,  $\Delta Q_1(t)$ ,  $\Delta \text{tg } \varphi(t)$  по управляющему воздействию  $\Delta U_3(t) = 0,1 \text{ В}$  для двух вариантов объекта управления и  $T_{\text{и}} = 0,01 \text{ с}$  представлены на рисунке 3.36.



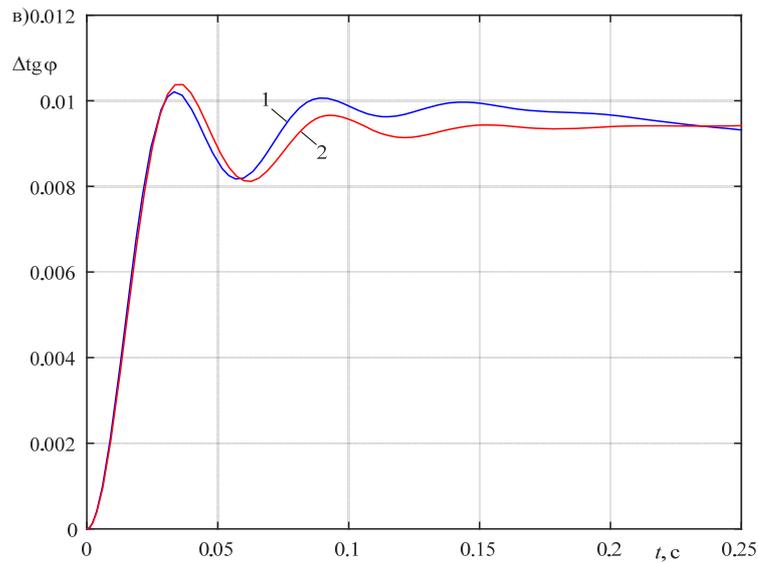


Рисунок 3.36 – Переходные характеристики в двухконтурной системе управления реактивной мощностью  $Q_1$  по управляющему воздействию  $\Delta U_3(t) = 0,1$  В (1 – первый вариант, 2 – второй вариант) для выходных переменных: а) –  $\Delta U_{\text{дм}}(t)$ ; б) –  $\Delta Q_1(t)$ ; в) –  $\Delta \text{tg} \varphi(t)$

Из анализа этих характеристик следует, что время затухания переходных процессов не превышает  $t_p = 0,2$  с, а перерегулирование 10%, что вполне допустимо в проектной и производственной практике.

На рисунке 3.37 представлены переходные характеристики в двухконтурной системе при изменении напряжения питания на величину  $\Delta U_2(t) = 600$  В для двух вариантов объекта управления и выходных величин –  $\Delta Q_1(t)$ ,  $\Delta \text{tg} \varphi(t)$ .

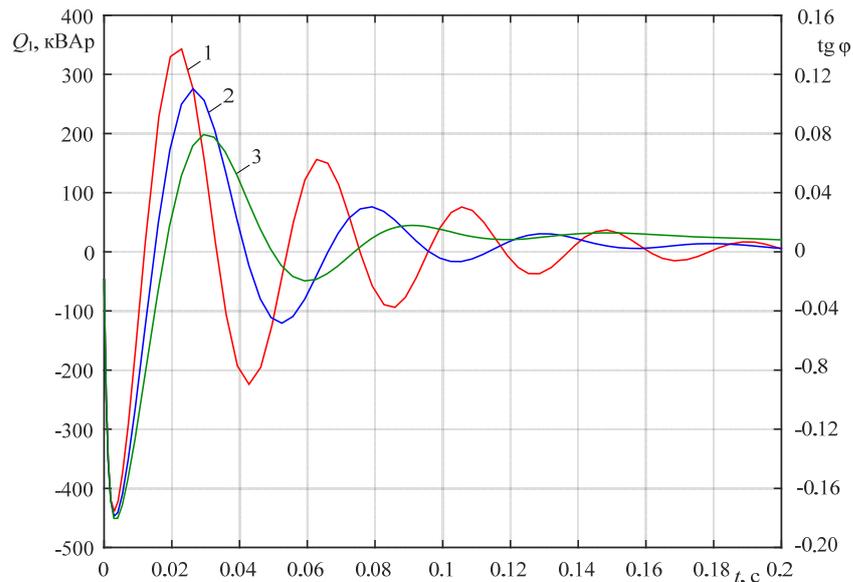


Рисунок 3.37 – Переходные характеристики в двухконтурной системе управления реактивной мощностью  $Q_1$  при изменении напряжения в сети  $\Delta U_2(t) = 600$  В: 1 –  $T_{и2} = 0,005$  с, 2 –  $T_{и2} = 0,01$  с, 3 –  $T_{и2} = 0,02$  с

Переходные характеристики на рисунке 3.37 отличаются повышенным значением динамического выброса, но с достаточно хорошим затуханием. Время переходного процесса менее 0,1 с.

Из сравнения динамических характеристик одноконтурной и двухконтурной системы управления реактивной мощностью синхронного двигателя можно сделать вывод (рисунок 3.35), что, несмотря на соизмеримость параметров их переходных характеристик (усредненных значений времени регулирования  $t_{py1} = 0,11$  с,  $t_{py2} = 0,14$  с) и большую конструктивную простоту одноконтурного варианта, практически более целесообразны двухконтурные системы, так как в них значительно проще ограничивать величину тока возбуждения двигателя.

Погрешность регулирования КРМ узла нагрузки складывается из погрешности датчика реактивной мощности и погрешности, вносимой коммутацией асинхронной нагрузки ( $\Delta \text{tg } \varphi_{\max} = 0,18$ ). При двухпроцентной погрешности датчика реактивной мощности  $\Delta \text{tg } \varphi_{\text{д}} = 0,005$  суммарная погрешность  $\Delta \text{tg } \varphi_{\Sigma} = 0,185$ .

### **3.6 Раскрытие противоречия между основными показателями качества процессов регулирования**

Известно [7, 16, 79, 88], что с уменьшением постоянной интегральной составляющей регулятора  $T_{\text{и}}$  увеличивается частота среза разомкнутой системы. В результате этого повышается быстродействие, но при этом нежелательно увеличивается перерегулирование  $\sigma$  и уменьшается величина запаса устойчивости по фазе  $\Delta\varphi$ .

В данной работе это противоречие решается выбором из семейства переходных характеристик  $X_{\text{вых}}(t, T_{\text{и}})$  одной характеристики с минимальным временем регулирования  $t_{\text{р}} = t_{\text{min}}$  и допустимыми значениями перерегулирования  $\sigma \leq \sigma_{\text{д}}$  и запасом устойчивости по фазе  $\Delta\varphi \geq \Delta\varphi_{\text{д}}$ .

Из семейства переходных характеристик (рисунок 3.21а) выбрана характеристика при  $T_{\text{и}} = 0,03$  с у которой  $t_{\text{min}} = t_1 = 0,2$  с;  $\Delta\varphi_1 = 35^\circ$ ;  $\sigma_1 = 37\%$ . А из семей-

ства характеристик (рисунок 3.35) выбрана характеристика при  $T_{и} = 0,005$  с у которой  $t_{\min} = t_2 = 0,075$  с;  $\Delta\varphi_2 = 47^\circ$ ;  $\sigma_2 = 12\%$ .

### 3.7 Экономическое обоснование САУ коэффициентом реактивной мощности СЭС с программным управлением

Потребители электроэнергии могут участвовать или отказаться от участия в регулировании реактивной мощности. Если потребитель не участвует в регулировании, то при номинальном напряжении сети  $U_{н} = 6 \div 20$  кВ и работе в часы больших нагрузок фиксируется [31] верхнее предельное значение  $\text{tg } \varphi_{\text{бв}} = 0,4$ , а при работе в часы малых нагрузок – нижнее предельное значение  $\text{tg } \varphi_{\text{бн}} = 0$ . При работе с фактическим коэффициентом  $\text{tg } \varphi_{\text{бф}} > 0,4$  и  $\text{tg } \varphi_{\text{мф}} < 0$  начисляется повышающий тарифный коэффициент.

Расчет повышающего коэффициента  $K_1$  к тарифу на электрическую энергию производится по методике Федеральной службы по тарифам (приказ от 31 августа 2010 г. №219-э/6) зарегистрированной в Министерстве Юстиции РФ 6 октября 2010 г., №18637 и дополненной приказом Министра энергетики РФ №380 от 23 июня 2015 г., по следующей формуле:

$$K_1 = 1 + 0,2(\text{tg } \varphi_{\text{бф}} - 0,4)d_6 - 0,2\text{tg } \varphi_{\text{мф}}(1 - d_6),$$

где  $d_6$  – отношение электроэнергии, которая потреблена в часы больших нагрузок электрической сети к общему объему электроэнергии, потребленной за расчетный период.

В случае применения САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом с компенсирующей связью по мощности асинхронной нагрузки можно обеспечить требуемый режим работы установки ( $\text{tg } \varphi_{\text{бф}} \leq \text{tg } \varphi_{\text{бв}}$ ,  $\text{tg } \varphi_{\text{мф}} > 0$ ) и тем самым избежать повышенных расходов за электрическую энергию. При этом дополнительные потери активной мощности в синхронном двигателе, обусловленные генерацией РМ, будут минимальными.

Если потребитель участвует в регулировании реактивной мощности по договору с энергоснабжающей организацией, то в договоре задаются следующие

параметры регулирования: нижнее и верхнее значение КРМ в часы малых нагрузок (МН)  $\text{tg } \varphi_{\text{МН}}$  и  $\text{tg } \varphi_{\text{МВ}}$ ; нижнее и верхнее значение КРМ в часы больших нагрузок (БН)  $\text{tg } \varphi_{\text{БН}}$  и  $\text{tg } \varphi_{\text{БВ}}$ ; допустимые значения погрешностей регулирования коэффициента реактивной мощности в часы МН –  $\Delta \text{tg } \varphi_{\text{М}}$  и часы БН –  $\Delta \text{tg } \varphi_{\text{Б}}$ ; фактические значения коэффициента реактивной мощности в часы МН –  $\text{tg } \varphi_{\text{Мф}}$  и в часы БН –  $\text{tg } \varphi_{\text{Бф}}$ ; значения коэффициентов  $d_{\text{Мр}}$ ,  $d_{\text{Бр}}$  равные отношениям электрической энергии, потребленной в часы МН и БН соответственно к общему объему электрической энергии, потребленной за расчетный период.

В случае не превышения потребления заданных значений реактивной мощности более чем на допустимые значения погрешности к потребителю применяется понижающий коэффициент, который рассчитывается согласно методике Федеральной службы по тарифам по следующей формуле:

$$K_2 = 1 - 0,2(\text{tg } \varphi_{\text{БВ}} - \text{tg } \varphi_{\text{Бф}})d_{\text{Бр}} - 0,2(\text{tg } \varphi_{\text{МВ}} - \text{tg } \varphi_{\text{Мф}})d_{\text{Мр}}. \quad (3.6)$$

Для рассматриваемой в работе установки эти параметры следующие:  $P_{\text{ср}} = 2470$  кВт;  $\text{tg } \varphi_{\text{БВ}} = 0,4$ ;  $\text{tg } \varphi_{\text{БН}} = 0$ ;  $\text{tg } \varphi_{\text{МВ}} = 0,3$ ;  $\text{tg } \varphi_{\text{МН}} = 0$ ;  $\text{tg } \varphi_{\text{Бф}} = 0,3$ ;  $\text{tg } \varphi_{\text{Мф}} = 0,24$ ;  $d_{\text{Мр}} = 0,33$ ;  $d_{\text{Бр}} = 0,67$ ;  $\Delta \text{tg } \varphi_{\text{Б}} = \Delta \text{tg } \varphi_{\text{М}} = 0,03$ .

В данном случае предусматривается увеличение потребления реактивной мощности в часы малых нагрузок (т.к.  $\text{tg } \varphi_{\text{МВ}} = 0,3$ ) по сравнению с обычным режимом (т.к.  $\text{tg } \varphi_{\text{МН}} = 0$ ), то согласно методике Федеральной службы по тарифам необходимо заменить в (3.6)  $\text{tg } \varphi_{\text{МВ}}$  на  $\text{tg } \varphi_{\text{МН}} = 0$ , а минус во вторых скобках на плюс. Тогда эта формула принимает следующий вид:

$$K_2 = 1 - 0,2(\text{tg } \varphi_{\text{БВ}} - \text{tg } \varphi_{\text{Бф}})d_{\text{Бр}} - 0,2\text{tg } \varphi_{\text{Мф}}d_{\text{Мр}}.$$

В результате расчета величина понижающего коэффициента составила  $K_2 = 0,971$ .

Годовая прибыль

$$\mathcal{E} = (1 - K_2)T_{\text{в}}P_{\text{ср}}(\gamma_{\text{Б}}d_{\text{Бр}} + \gamma_{\text{М}}d_{\text{БМ}})$$

при цене за электроэнергию  $\gamma_{\text{М}} = 1,036$  руб/кВт·ч и  $\gamma_{\text{Б}} = 3,672$  руб/кВт·ч,  $T_{\text{в}} = 8000$  ч,  $P_{\text{ср}} = 2470$  кВт составила  $\mathcal{E} = 1\,557\,900$  руб.

### 3.8 САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом с отрицательными обратными связями по току возбуждения и реактивной мощности СД и с компенсирующей связью по мощности асинхронной нагрузки

Алгоритм функционирования компенсирующей связи по мощности асинхронной нагрузки следует из выражения

$$\Delta U_1 = k_M (\Delta Q_2'' - \Delta P_2 \operatorname{tg} \varphi_3), \quad (3.7)$$

где  $\Delta P = P_2$ ;  $\Delta U_1 = k_M \Delta Q_1$ ;  $k_M$  – коэффициент передачи датчика мощности.

Зависимость реактивной мощности СД от  $\operatorname{tg} \varphi_3$  приведена в таблице 2.8 и представлена прямой линией на рисунке 3.39.

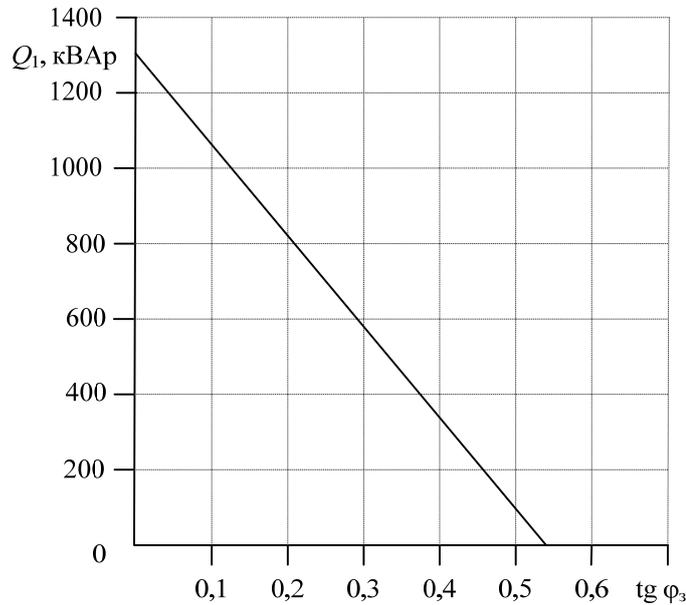


Рисунок 3.39 – Зависимость реактивной мощности синхронного двигателя от заданного коэффициента РМ узла нагрузки

Структурная схема синхронного электропривода с отрицательными обратными связями (ООС) по току возбуждения и реактивной мощности синхронного двигателя и компенсирующей связью (КС) по мощности асинхронной нагрузки ( $\Delta P_2$ ,  $\Delta Q_2''$ ) представлена на рисунке 3.40.

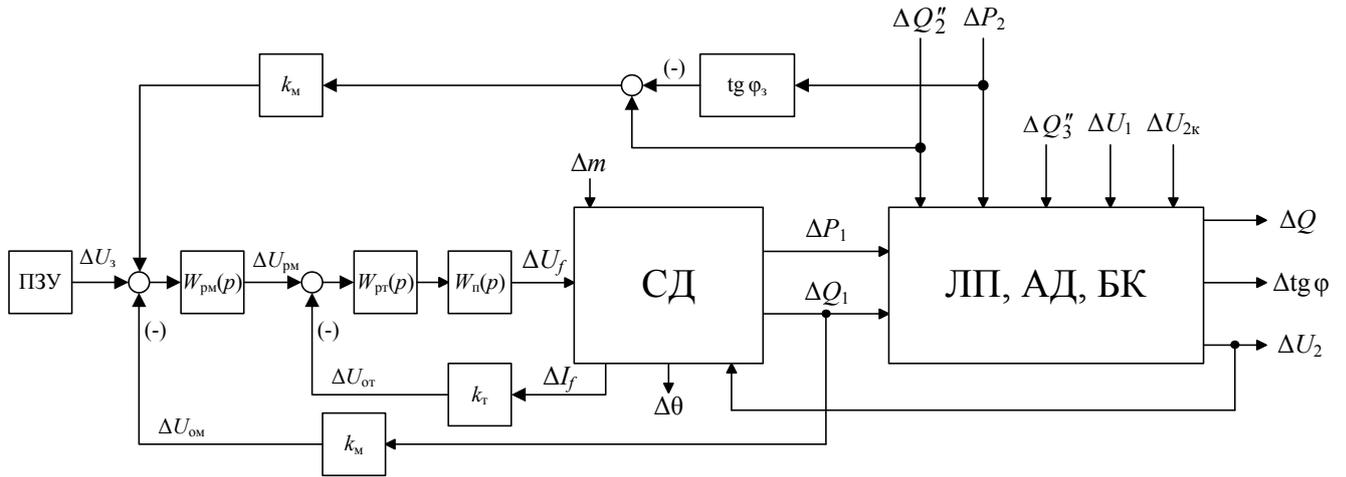


Рисунок 3.40 – Структурная схема синхронного электропривода с ООС по  $\Delta I_f$ ,  $\Delta Q_1$  и КС по  $\Delta P_2$ ,  $\Delta Q_2''$

Структурная схема электропривода для установившегося режима представлена на рисунке 3.41.

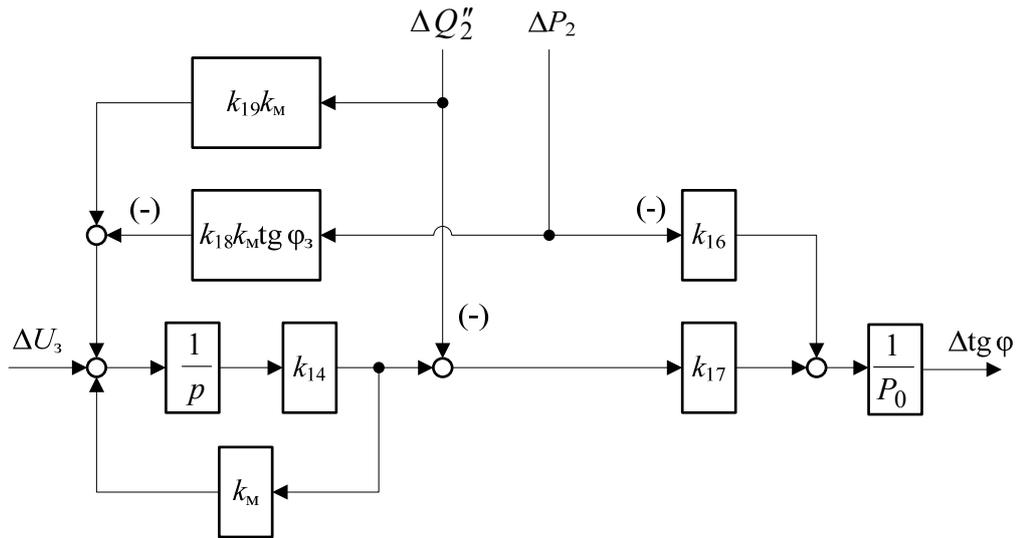


Рисунок 3.41 – Структурная схема синхронного электропривода в статике

На рисунке 3.41 обозначены:

$$k_{16} = \frac{(k_8 - k_7)k_9}{1 - k_{10}(k_{15} - k_7)} - \text{tg } \varphi_3; \quad \text{tg } \varphi_3 = \frac{Q_0 - Q_1}{P_0}; \quad k_{17} = \frac{1}{1 - k_{10}(k_{15} - k_7)};$$

$$k_{14} = \frac{X_{ad}}{R_f} \left( \frac{k_1 k_4}{E_{q0}} + k_5 \right); \quad k_{15} = \frac{k_1 k_4}{U_{02}} + k_3.$$

Уравнение статики для выходной величины:

$$\Delta \text{tg } \varphi = \frac{\Delta Q_2'' k_{17}}{P_0} (k_{19} - 1) + \frac{\Delta P_2}{P_0} (-k_{17} k_{18} \text{tg } \varphi_3 - k_{16}).$$

Инвариантность выходной величины  $\Delta \text{tg } \varphi = 0$  от возмущающих воздействий  $\Delta P_2$  и  $\Delta Q_2''$  при  $k_{16} \approx -\text{tg } \varphi_3$ ,

$$\frac{\Delta Q_2''}{P_0} k_{17} (k_{19} - 1) + \frac{\Delta P_2}{P_0} \text{tg } \varphi_3 (-k_{17} k_{18} + 1) = 0$$

выполняется при  $k_{18} = k_{17}^{-1}$  и  $k_{19} = 1$ .

При  $k_1 = -0,75$ ,  $k_4 = -1290$  кВАр,  $U_{02} = 6000$  В,  $k_3 = -0,078$  кА,  $k_7 = 0,26$  кА,  $k_{10} = -0,24$  кА<sup>-1</sup>,  $k_{15} = 0,083$  кА,  $k_{17} = 1,04$  величина  $k_{18} = 0,96$ .

Поэтому погрешность регулирования  $\Delta \text{tg } \varphi$  определяется погрешностью датчиков реактивной мощности  $\delta_{\text{рм}}$ . При двухпроцентной погрешности датчика в цепи обратной связи  $\delta_{\text{рм}} = 0,02$  величина  $\Delta \text{tg } \varphi_1 = 0,005$ . При этой же погрешности датчиков мощности в цепи компенсирующей связи величина  $\Delta \text{tg } \varphi_2 = 0,0025$ . Суммарная погрешность  $\Delta \text{tg } \varphi_{\Sigma} = 0,0075$ , что меньше заданной величины  $\Delta \text{tg } \varphi_3 = 0,05$ .

Значения погрешности в установившемся режиме в электроприводах с различными обратными связями собраны в таблице 3.3.

Таблица 3.3

№	САУ коэффициентом РМ с СЭП	Погрешность $\Delta \text{tg } \varphi$
1	Без ООС и КС	0,214
2	С ООС по $\Delta I_f$	0,2
3	С ООС по $\Delta \theta$	0,26
4	С ООС по $\Delta Q_1$	0,185
5	С ООС по $\Delta Q_1$ и КС по $\Delta Q_2''$ и $\Delta P_2$	0,0075

Из анализа данных этой таблицы следует, что требуемая погрешность  $\Delta \text{tg } \varphi_3 = 0,03$  может быть получена только при использовании автоматизированного электропривода с программным управлением и с ООС по  $\Delta Q_1$  и КС по  $\Delta Q_2''$ ,  $\Delta P_2$ .

Восстановление коэффициента РМ при отключении (рисунок 3.42) и включении (рисунок 3.43) асинхронных двигателей марки А113-4М в системе управления синхронным электроприводом с компенсирующей связью по  $\Delta Q_2''$  и  $\Delta P_2$  происходит за время не более 2,5 секунд с ошибкой от изменения асинхронной

нагрузки в установившемся режиме равной нулю (без учета погрешности регистрирующих приборов). Значение ошибок в разомкнутой системе без КС приведены в таблице 2.8.

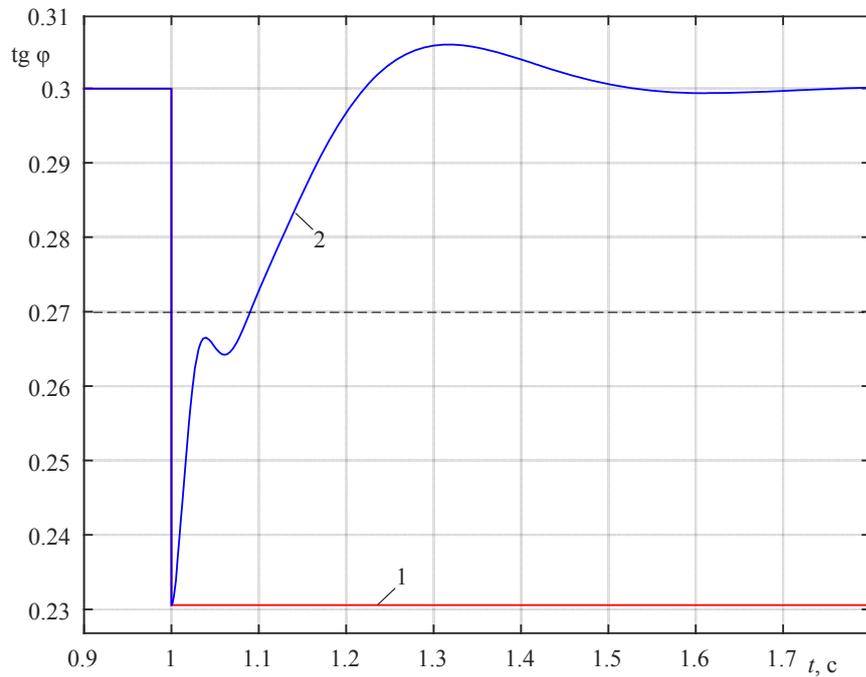


Рисунок 3.42 – Зависимость  $\text{tg } \varphi(t)$  при отключении двух двигателей А113-4М: 1 – без КС по  $\Delta P_2$  и  $\Delta Q_2''$ ; 2 – с КС по  $\Delta P_2$  и  $\Delta Q_2''$

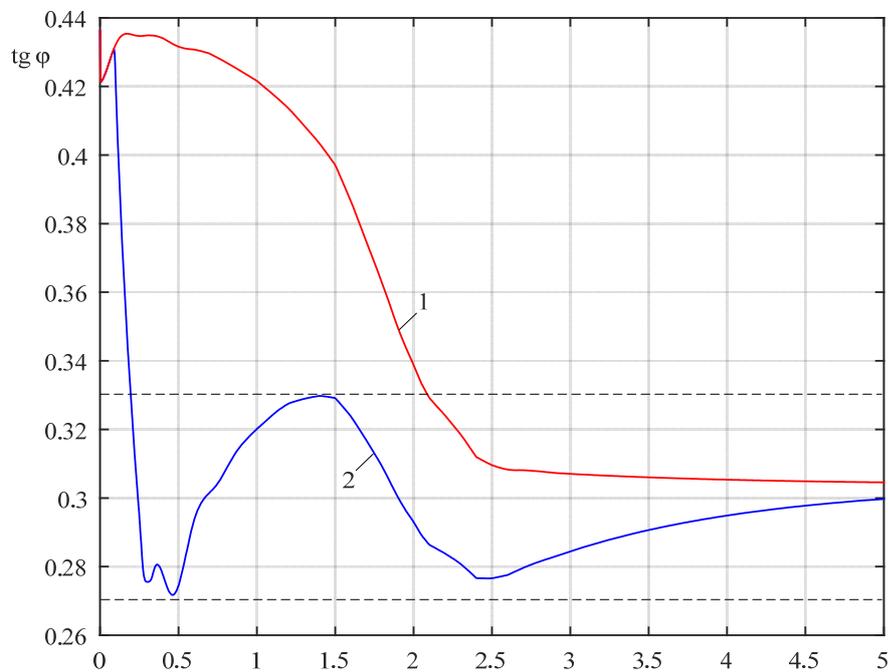


Рисунок 3.42 – Зависимость  $\text{tg } \varphi(t)$  при разгоне двигателя А113-4М: 1 – без КС по  $\Delta P_2$  и  $\Delta Q_2''$ ; 2 – с КС по  $\Delta P_2$  и  $\Delta Q_2''$

Программа задающего сигнала, формируемая программно-задающим устройством ПЗУ в зависимости от времени суток представлена на рисунке 3.44 ( $n$  – число месяца). Она составлена на основании данных таблицы 2.8 и рисунка 3.39.

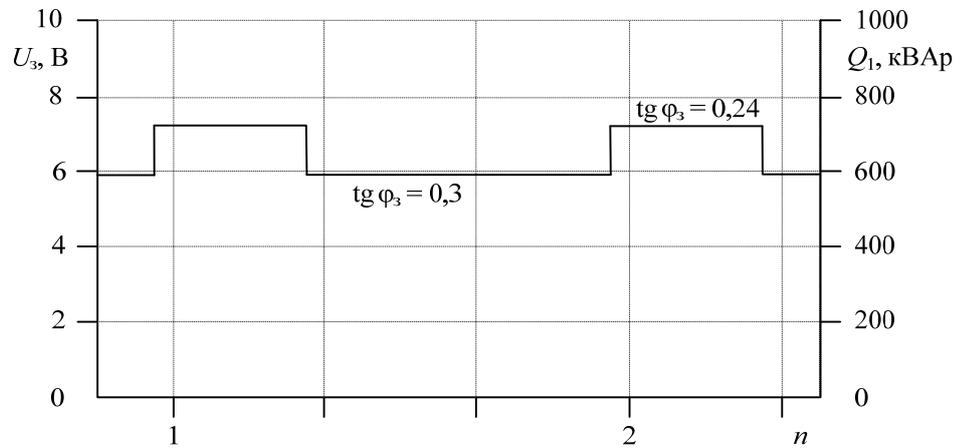


Рисунок 3.43 – Временная зависимость сигнала задания  $U_3$  и реактивной мощности  $Q_1$  при работе электропривода в режиме малых ( $\text{tg } \varphi_3 = 0,24$ ) и больших ( $\text{tg } \varphi_3 = 0,3$ ) нагрузок

Так как экономически целесообразная загрузка синхронного двигателя СТД 1250 по реактивной мощности в длительном режиме не должна превышать  $0,6Q_{1н} = 380$  кВАр, а согласно программы (рисунок 3.44) он должен генерировать значительно больше РМ ( $Q_{1мн} = 731$  кВАр,  $Q_{1бн} = 594$  кВАр), то с целью избежания его перегрузки на подстанции предусмотрена комплектная конденсаторная установка УКРЛ 56,  $U_n = 6,3$  кВ,  $Q_{3н} = 300$  кВАр.

В этом случае генерируемая синхронным двигателем реактивная мощность составляет:  $Q_1 = 244$  кВАр при  $\text{tg } \varphi_3 = 0,24$  и  $Q_1 = 380$  кВАр при  $\text{tg } \varphi_3 = 0,3$ .

### 3.8 Выводы по третьей главе

3.8.1. Показано, что структурную схему синхронного двигателя с обратной связью по внутреннему углу можно представить в виде двух последовательно включенных звеньев, между которыми находится промежуточная переменная – ток возбуждения двигателя и тем самым упростить синтез контура регулирования тока возбуждения.

3.8.2. Показано, что в синхронном электроприводе с обратной связью по углу при уменьшении напряжения питания наблюдается положительный эффект – уве-

личение реактивной мощности двигателя и при том на большую величину, чем она уменьшается в электроприводе без обратных связей.

3.8.3. Показано, что из сравнения динамических характеристик одноконтурных систем управления углом нагрузки или реактивной мощностью синхронного двигателя и двухконтурных систем управления этими величинами (с внутренним контуром регулирования тока возбуждения) следует отдавать предпочтение двухконтурным системам, так как в них проще конструктивно ограничить величину тока возбуждения, а регуляторы, практически при тех же показателях качества регулирования, имеют более простую структуру.

3.8.4. Показано, что одноконтурная система управления внутренним углом СД предпочтительна в синхронных электроприводах с ударной нагрузкой, а двухконтурная система – в электроприводах с постоянной нагрузкой для которых основным переходным процессом является процесс по управляющему воздействию.

3.8.5. Установлено, что погрешность системы управления коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом с отрицательной обратной связью по реактивной мощности синхронного двигателя и компенсирующей связью по активной и реактивной мощности асинхронной нагрузки меньше погрешности альтернативных систем управления с другими обратными связями и составляет  $\Delta \text{tg } \varphi_{\Sigma} = 0,0075$ , что значительно меньше заданного значения  $\Delta \text{tg } \varphi_3 = 0,03$ , а при отключении асинхронных двигателей А113-4М восстановление коэффициента РМ происходит за 0,26 с.

3.8.6. Показано, что применение системы автоматического управления коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом с программным управлением позволило понизить тарифный коэффициент на электроэнергию на 2,9% и тем самым получить значительный экономический эффект от участия в регулировании реактивной мощности в размере 1,5 млн. рублей в год.

## 4 РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

### 4.1 Внедрение в практику элементов системы управления коэффициентом реактивной мощности

Для автоматического регулирования возбуждения синхронного двигателя широко используются комплектные тиристорные преобразователи (возбудители), разработанные ЦПТКБ, КЭМ, ВНИИ «Электропривод», «Уралэлектротяжмаш».

При построении систем управления возбуждением используются две их разновидности: системы с параллельным суммированием сигналов обратной связи (с одним регулятором) и системы с каскадным включением регуляторов (с двумя регуляторами).

По первому методу выполнен широко используемый возбудитель типа ТЕ8-320-5, по второму методу реализована система КТУ-ВС, которая разработана ВНИИ «Электропривод». Синхронные электроприводы, рассмотренные в данной работе, ориентированы на реализацию в системе КТУ-ВС с возбудителем типа ВТЦ-СД-Щ.

Методика расчета параметров схемы замещения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором внедрена в практику инженерного обслуживания на КНС «Бариновская» АО «Самаранефтегаз», которая использована для определения дополнительного превышения температуры обмоток  $\Delta\theta$  при перегрузке током кратностью  $k_{иср}$  во время пуска и самозапуска двигателей А113-4М, А114-4М.

Методика расчета и настройки регуляторов также использована при настройке регуляторов системы управления возбуждением синхронного двигателя СТД-1250.

Значения сопротивлений двигателей, рассчитанных по предложенной методике (рисунок 2.33) оказались равными:

– для двигателя А113-4М:  $P_H = 250$  кВт;  $\eta_H = 0,941$ ;  $\cos \varphi_H = 0,87$ ;  $b_H = 2,5$ ;  $M_H = 1,0$ ;  $R_1 = 2,6$  Ом;  $R_2 = 1,8$  Ом;  $x_K = 26$  Ом;  $R_2(1) = 3,4$  Ом;  $x_K(1) = 19,4$  Ом;  $x_\mu = 547$  Ом;

– для двигателя А114-4М:  $P_H = 320$  кВт;  $R_1 = 1,5$  Ом;  $R_2 = 1,4$  Ом;  $x_K = 21$  Ом;  $R_2(1) = 2,7$  Ом;  $x_K(1) = 15,6$  Ом;  $x_\mu = 344$  Ом.

Превышение температуры обмоток определяется по выражению [89]

$$\Delta\theta = \frac{k_R j^2}{150} (k_{i\text{ср}}^2 - 1) t_{\text{ср}}, \quad (4.1)$$

где  $k_R = R_2(1)/R_2$  – коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления за счет вытеснения тока;  $j$  – плотность тока в номинальном режиме;  $t_{\text{ср}}$  – средняя величина времени при котором величина тока равна среднему значению.

Среднее значение кратности пускового тока

$$k_{i\text{ср}} = \int_0 k_i(t) dt. \quad (4.2)$$

Величина

$$k_i(t) = \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H \sqrt{R^2(s) + x^2(s)}}, \quad (4.3)$$

где  $R(s)$ ,  $x(s)$  вычисляются по выражениям (2.30), (2.31).

Временная зависимость скольжения получена из решения уравнения движения асинхронного электропривода насоса

$$\tau_y \frac{ds(t)}{dt} + \frac{2b_H s_K s(t)}{s^2(t) + s_K^2} = M_{*c}. \quad (4.4)$$

Время ускорения электропривода

$$\tau_y = \frac{(J_D + J_{\text{мех}}) \omega_0}{M_H}$$

обусловлено моментом инерции  $J$ , частотой вращения  $\omega_0$  и номинальным моментом  $M_H$ .

Момент сопротивления насоса

$$M_{*c} = M_{*cH} + (1 - M_{*cH})(1 - s(t))^2, \quad (4.5)$$

где  $M_{*c} = M_c / M_{сн}$  – относительная величина момента сопротивления насоса.

Временная зависимость скольжения, полученная из решения уравнения (4.4) при  $\tau_y = 2,34$  с,  $M_{*сн} = 0,2$ ,  $s_k = 0,077$ , представлена кривой 1 на рисунке 4.1.

Временная зависимость кратности пускового тока  $k_i(t)$ , построенная по выражению (4.3) при  $U_H = 6000$  В,  $I_H = 27,7$  А представлена кривой 2 на рисунке 4.1.

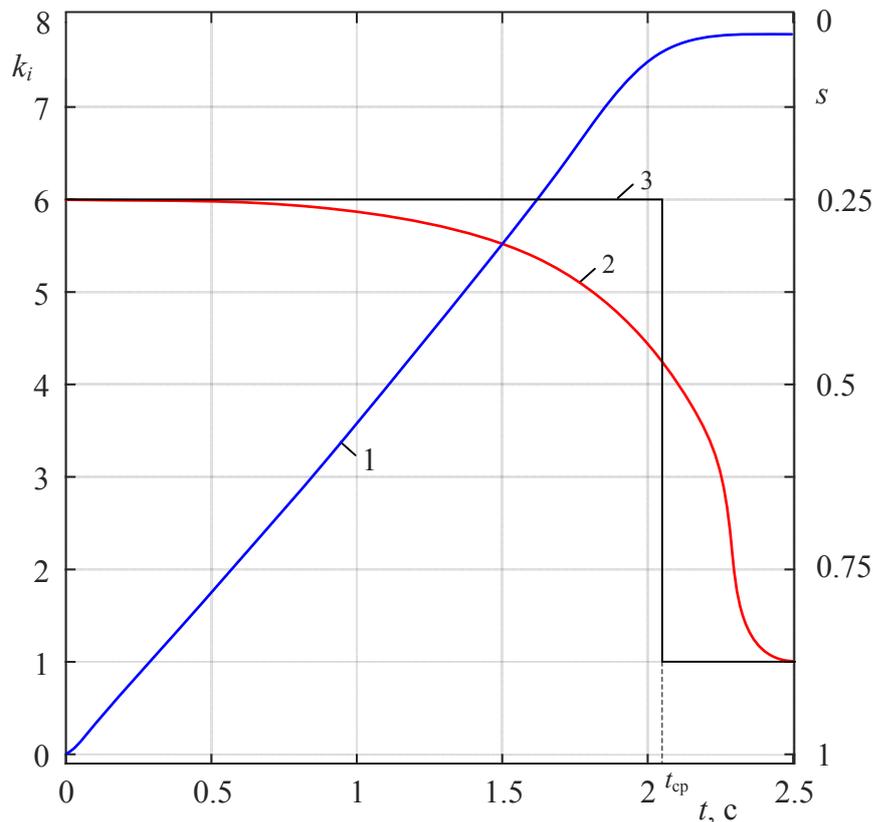


Рисунок 4.1 – Временные зависимости величин при пуске асинхронного двигателя А113-4М:

1 – скольжение  $s(t)$ ; 2 –  $k_i(t)$ ; 3 –  $k_{ип}(t)$

Дополнительное превышение температуры обмотки статора согласно выражения (4.1) при  $k_R = 1,9$ ,  $j = 4,5$  А/мм<sup>2</sup>,  $k_{ип} = 6$ ,  $t_{сп} = 2,05$  с составляет  $\Delta\theta = 18,5^\circ\text{C}$ , что при температуре окружающей среды  $\theta_{сп} \leq 21,5^\circ\text{C}$  для изоляции класса В и F не превышает допустимых значений.

#### 4.2 Устройство экспериментальной установки системы управления коэффициентом реактивной мощности

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рисунке 4.2.

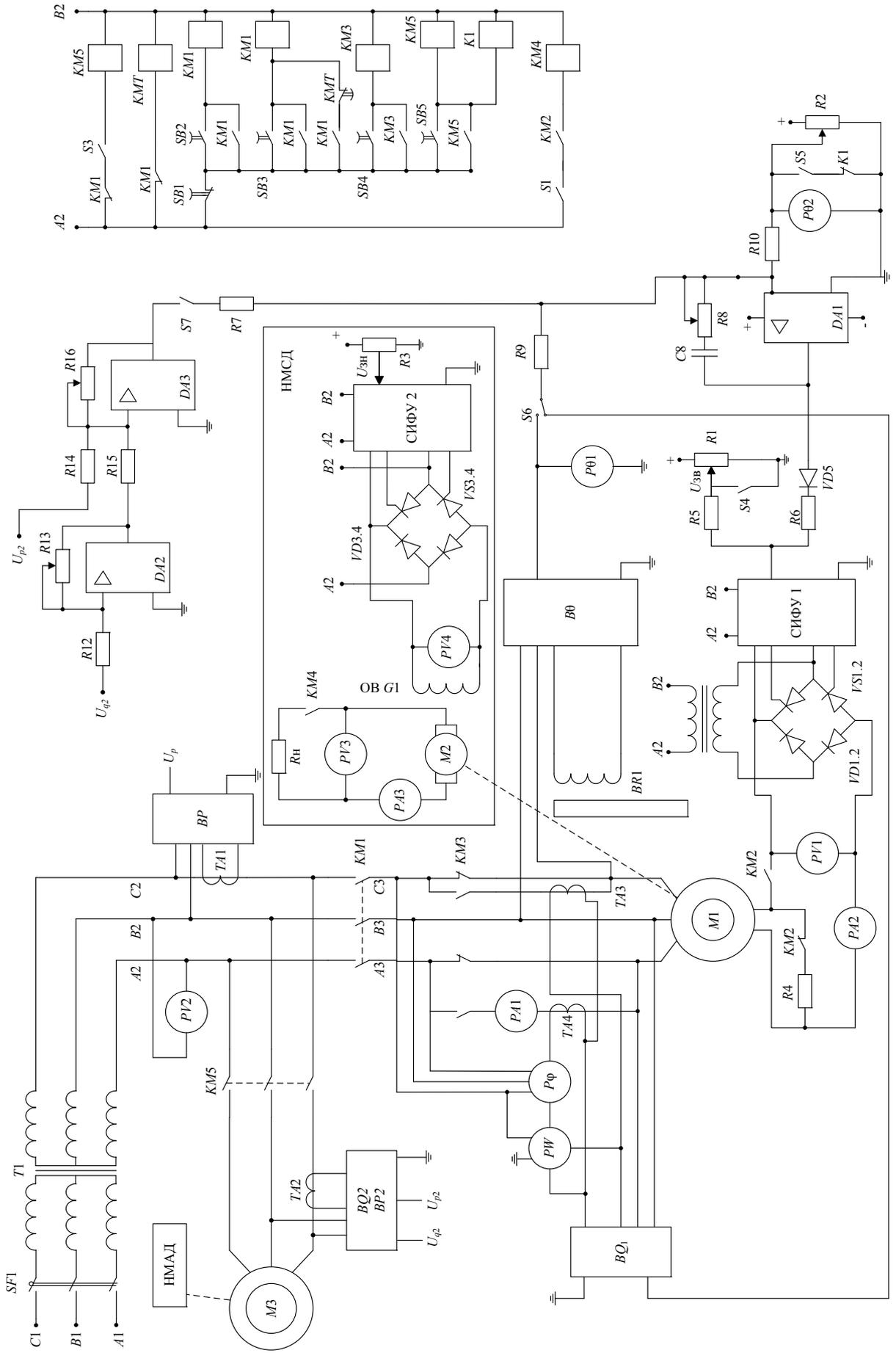


Рисунок 4. 2 – Принципиальная схема системы управления коэффициентом реактивной мощности

В состав экспериментальной установки входят следующие основные элементы: Силовой трансформатор  $T1$  ( $S_n = 10$  кВА,  $U = 380/220$  В); синхронный электродвигатель  $M1$  с нагрузочной машиной  $M2$  (НМСД); асинхронный электродвигатель  $M3$  с нагрузочной машиной (НМАД); датчики активной и реактивной мощностей  $BP$ ,  $BQ_1$ ,  $BQ_2$  типа E849 M (погрешность датчика 1%) с нормирующими преобразователями типа НПЦИ-УНТ (погрешность преобразователя 0,1%); датчик внутреннего угла машины  $B\theta$ ; узел компенсирующей связи  $DA2$ ,  $DA3$ ; источник питания обмотки возбуждения синхронного электродвигателя (СИФУ1,  $VD1.2$ ,  $VS1.2$ ); регулятор внутреннего угла  $\theta$  или реактивной мощности ( $DA1$ ,  $C8$ ,  $R8$ ) и релейно-контакторная схема управления.

На валу синхронного двигателя  $M1$  находится диск  $BR$  с четырьмя постоянными магнитами, которые являются первичными датчиками внутреннего угла  $\theta$  синхронного двигателя. Его обмотка возбуждения подключена к управляемому двухфазному выпрямителю  $VS1.2$ ,  $VD1.2$ , СИФУ с трансформатором  $TV1$ .

Для измерения угла нагрузки  $\theta$ , угла  $\varphi$ , мощности двигателя, активной мощности  $P$ , напряжения и тока нагрузочной машины  $G1$  предусмотрены приборы:  $P\theta1$ ,  $P\varphi$ ,  $PW$ ,  $PQ$ ,  $PA3$ ,  $PV3$ .

В качестве машины  $M3$  выбран асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором 4A100S2Y3:  $P_n = 4$  кВт;  $U_n = 230$  В;  $\eta_n = 0,865$ ;  $\cos \varphi_n = 0,89$ ;  $s = 0,033$ ;  $b_n = 2,5$  В;  $k_i = 7,5$ . Нагрузочная машина – электродвигатель постоянного тока П-22.

В качестве синхронного электродвигателя используется синхронная машина ЕС52-4-М101;  $U_n = 230$  В;  $U_n = 220$  В;  $I_n = 15,7$  А;  $\omega_n = 157$  с<sup>-1</sup>;  $\cos \varphi_n = 0,8$ ;  $I_{fn} = 6,3$  А;  $I_{fm} = 9$  А;  $U_{fm} = 16$  В;  $\eta_n = 0,84$ .

### 4.3 Исследование системы управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения с внутренней обратной связью по реактивной мощности и компенсирующей связью по мощности асинхронного двигателя на экспериментальной установке

Расчетная математическая модель объекта управления – синхронного двигателя, реализованная в MATLAB Simulink, показана на рисунке 2.21.

Результаты экспериментальных исследований синхронного двигателя представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Номер эксперимента	$P$ , кВт	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$Q$ , кВАр	$I_2$ , А	$\theta$ , °	$U_c$ , В
1	3,6	0,96	0,29	1,05	6	21	230
2	3,6	0,985	0,175	0,63	5,4	22,05	
3	3,07	0,925	0,55	1,25	6	17,4	
4	3,6	0,983	0,186	0,67	6	23,2	205

Векторная диаграмма, построенная по результатам первого эксперимента, представлена на рисунке 4.3.

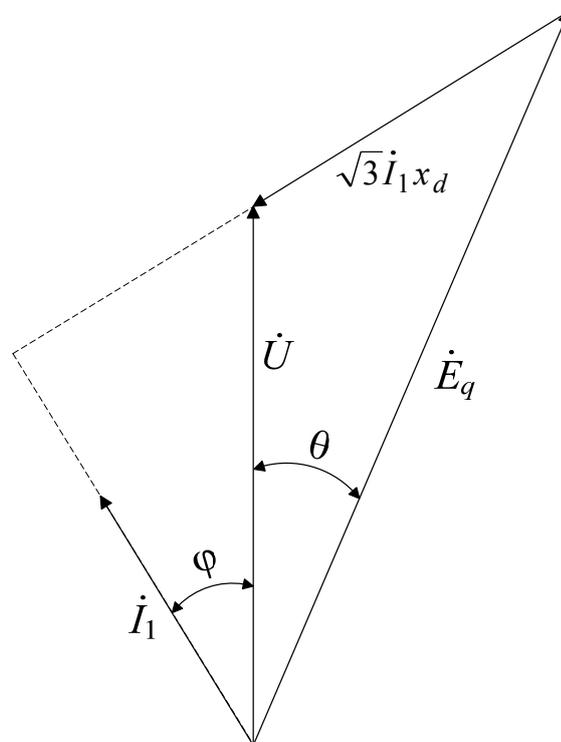


Рисунок 4.3 – Векторная диаграмма двигателя

Из векторной диаграммы получено:  $x_d = 8,6$  Ом,  $E_q = 300$  В. Значения коэффициентов, вычисленные по соотношениям (2.11, 2.18):  $k_1 = -0,38$ ;  $k_3 = -20,7$  ВА;  $k_4 = -2744$  ВА;  $k_5 = 25$  А;  $x_{ad} = 25$  Ом.

При скачкообразном уменьшении тока возбуждения на величину  $\Delta I_f = 0,6$  А (относительно  $I_f = 6$  А) расчетное значение угла нагрузки  $\theta$  составляет  $\theta_p = 22,02^\circ$  (рисунок 4.7 кривая 1), экспериментальное значение –  $\theta_s = 22,05^\circ$  (рисунок 4.4 кривая 2). Погрешность в установившемся режиме составляет 5,4%. Динамическая погрешность составляет 8,9%.

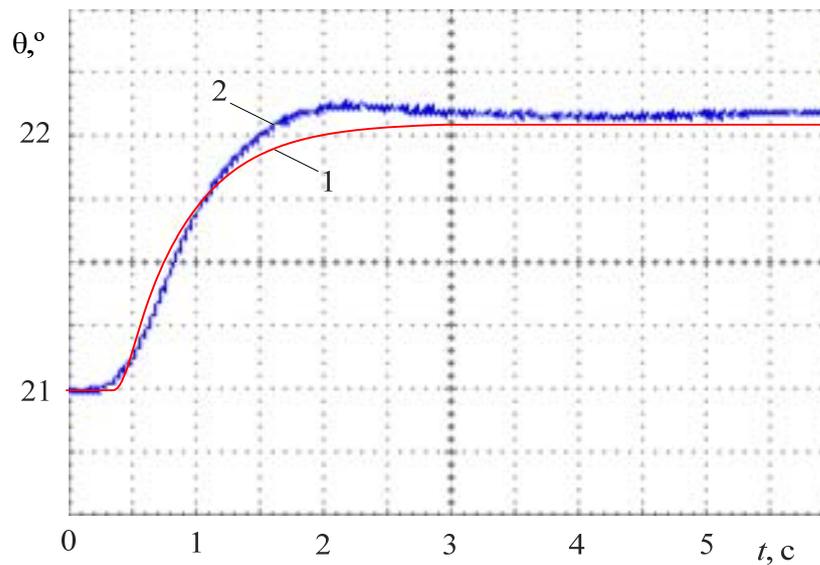


Рисунок 4.4 – Переходные характеристики  $\theta(t)$  при изменении тока возбуждения от  $I_{f1} = 6$  А до  $I_{f2} = 5,4$  А: 1 – расчетная, 2 – экспериментальная

При уменьшении нагрузки на величину  $\Delta P = 0,53$  кВт (относительно  $P = 3,6$  кВт) расчетное значение угла нагрузки  $\theta$  составляет  $\theta_p = 17,2^\circ$  (рисунок 4.5 кривая 1), экспериментальное значение –  $\theta_s = 17,4^\circ$  (рисунок 4.5 кривая 2). Погрешность в установившемся режиме составляет 5,13%. Динамическая погрешность составляет 6,3%.

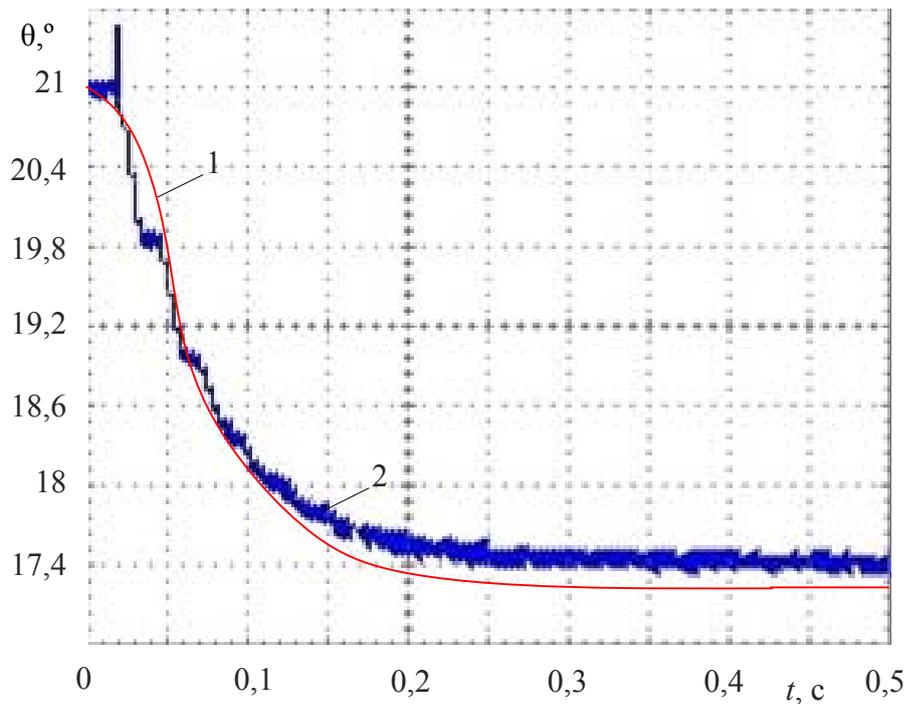


Рисунок 4.5 – Переходные характеристики  $\theta(t)$  при изменении нагрузки от  $P = 3,6$  кВт до  $P = 3,07$  кВт: 1 – расчетная, 2 – экспериментальная

При уменьшении напряжения питания от  $U_c = 230$  В до  $U_c = 205$  В расчетное значение угла нагрузки  $\theta$  составляет  $\theta_p = 23,32^\circ$  (рисунок 4.6 кривая 1), экспериментальное значение –  $\theta_s = 23,2^\circ$  (рисунок 4.6 кривая 2). Погрешность в установившемся режиме составляет 5,45%. Динамическая погрешность составляет 8,9%.

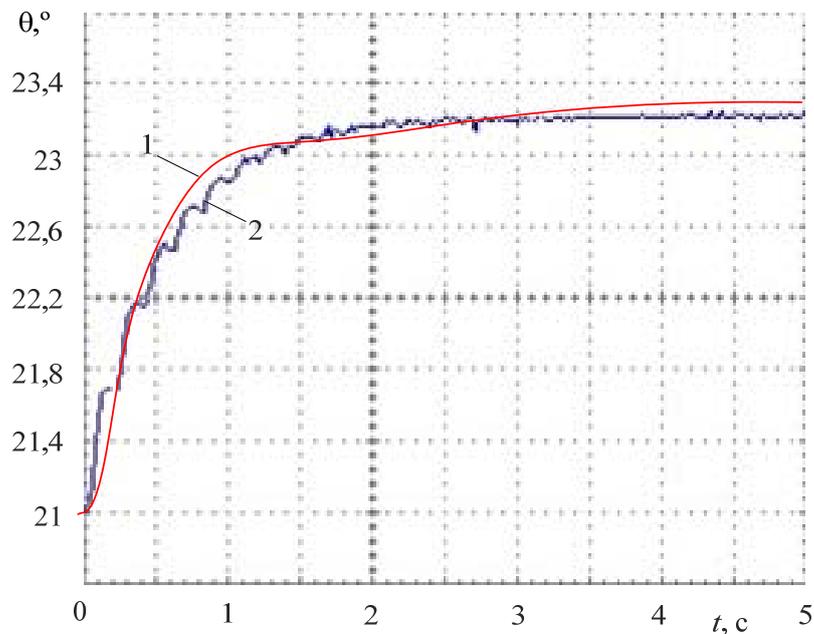


Рисунок 4.6 – Переходные характеристики  $\theta(t)$  при изменении напряжения питания от  $U_c = 230$  В до  $U_c = 205$  В: 1 – расчетная, 2 – экспериментальная

Экспериментальные характеристики получены с помощью цифрового осциллографа GDS-806C, лицевая панель которого представлена на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Цифровой осциллограф GDS-806C

Общий вид синхронного электропривода с обратной связью по реактивной мощности представлен на рисунке 4.8, а его расчетная математическая модель в MATLAB Simulink – на рисунке 3.25.



Рисунок 4.8 – Общий вид СЭП

При увеличении задающего воздействия на величину  $\Delta U_3 = 0,4$  В увеличение расчетного значения реактивной мощности составляет  $\Delta Q_p = 400$  ВАр (рисунок 4.9 кривая 1), экспериментального значения – на  $\Delta Q_3 = 417$  ВАр (рисунок 4.9 кривая 2). Погрешность в установившемся режиме составляет 4,07%. Динамическая погрешность составляет 8,3%.

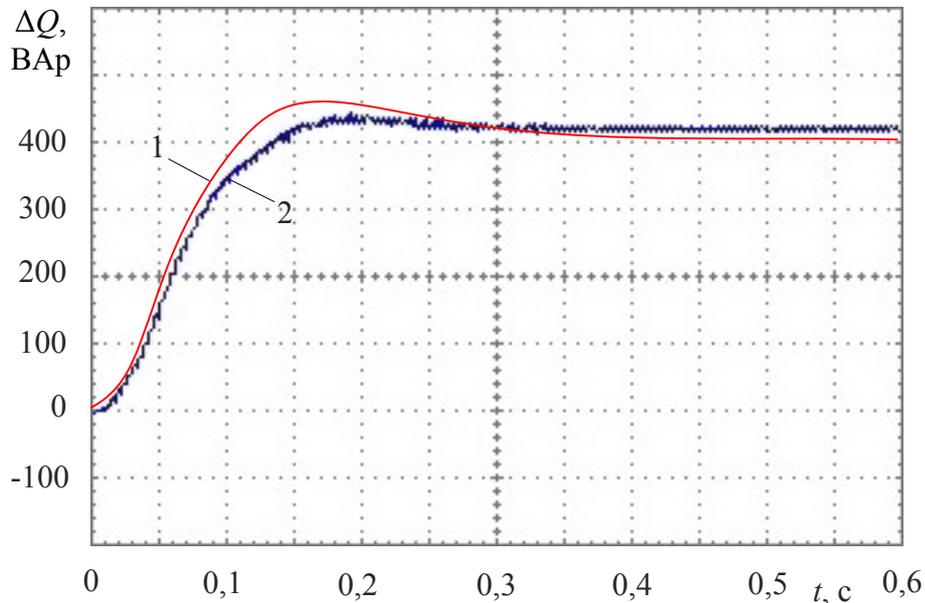


Рисунок 4.9 – Переходные характеристики  $\Delta Q(t)$  при изменении задающего воздействия на величину  $\Delta U_3 = 0,4$  В: 1 – расчетная, 2 – экспериментальная

При увеличении нагрузки на величину  $\Delta P = 0,53$  кВт (с  $P_1 = 3,07$  кВт до  $P_2 = 3,6$  кВт) расчетное значение динамического провала реактивной мощности составляет  $\Delta Q_p = -25$  ВАр (рисунок 4.10 кривая 1), экспериментальное значение –  $\Delta Q_3 = -26,5$  ВАр (рисунок 4.10 кривая 2). Погрешность в установившемся режиме составляет 5,7%. Динамическая погрешность составляет 8,9%.

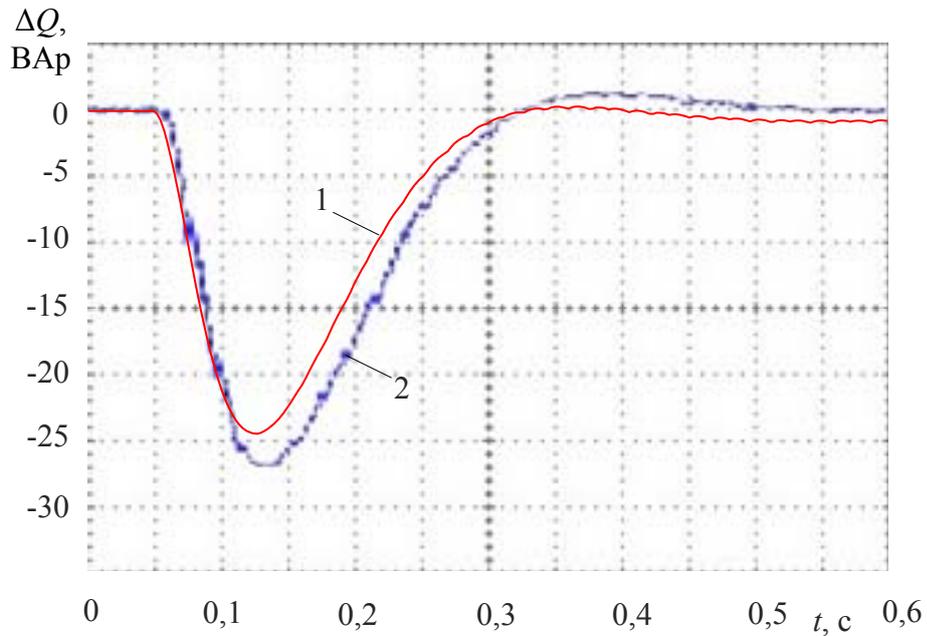


Рисунок 4.10 – Переходные характеристики  $\Delta Q(t)$  при увеличении нагрузки на величину  $\Delta P = 0,53$  кВт: 1 – расчетная, 2 – экспериментальная

При уменьшении напряжения питания от  $U_c = 230$  В до  $U_c = 205$  В расчетное значение динамического провала реактивной мощности составляет  $\Delta Q_p = -681$  ВАр (рисунок 4.11 кривая 1), экспериментальное значение –  $\Delta Q_s = -631$  ВАр (рисунок 4.11 кривая 2). Динамическая погрешность составляет 7,9%.

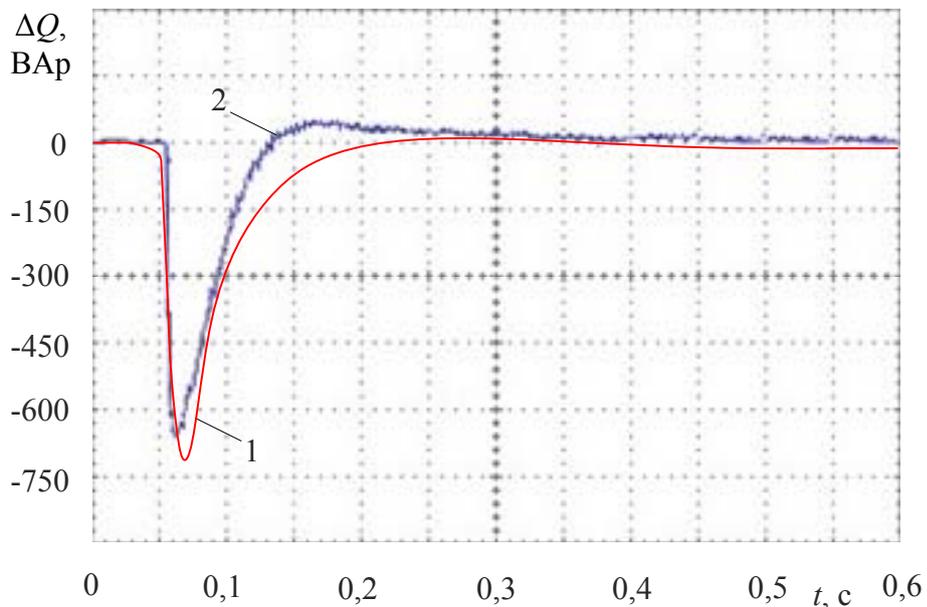


Рисунок 4.11 – Переходные характеристики  $\Delta Q(t)$  при изменении напряжения питания от  $U_c = 230$  В до  $U_c = 205$  В: 1 – расчетная, 2 – экспериментальная

Структурная схема системы управления коэффициентом РМ с компенсирующей связью по мощности асинхронной нагрузки представлена на рисунке 3.40.

Алгоритм функционирования компенсирующей связи, составленный согласно (3.7), имеет вид:

$$\Delta U_{13} = k_M (\Delta Q_2 - \Delta P_2 \operatorname{tg} \varphi_3),$$

Приращение напряжения  $\Delta U_{13}$ , задающего приращение реактивной мощности синхронного электродвигателя  $\Delta Q_{13}$ , определяется относительно установившегося значения

$$U_{13} = -P_1 \operatorname{tg} \varphi_3.$$

Знак минус показывает, что заданная реактивной мощность синхронного двигателя в этом режиме потребляется из сети.

Структурная схема системы управления коэффициентом реактивной мощности с КС по  $\Delta Q_2$  и  $\Delta P_2$  в установившемся режиме, построенная по выражению (4.6), представлена на рисунке 4.12.

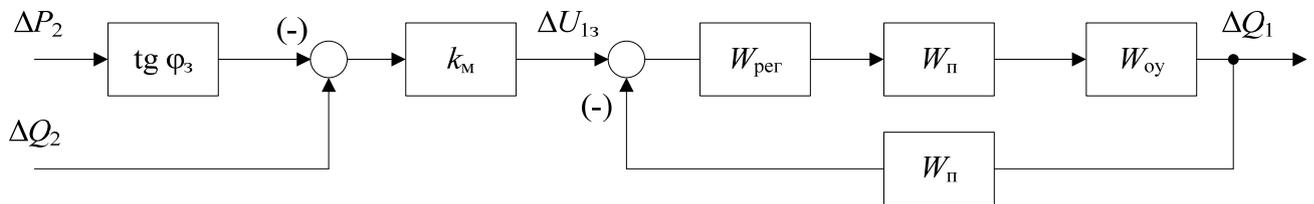


Рисунок 4.12 – Структурная схема системы управления коэффициентом РМ с КС по  $\Delta Q_2$  и  $\Delta P_2$

Напряжение  $\Delta U_{13}$  определяется координатой точки пересечения характеристики реактивной мощности синхронного электродвигателя (рисунок 4.13) с осью абсцисс. Напряжение  $\Delta U_{13}$ , отложенное по оси абсцисс, соответствует  $k_M = 1 \text{ кА}^{-1}$ .

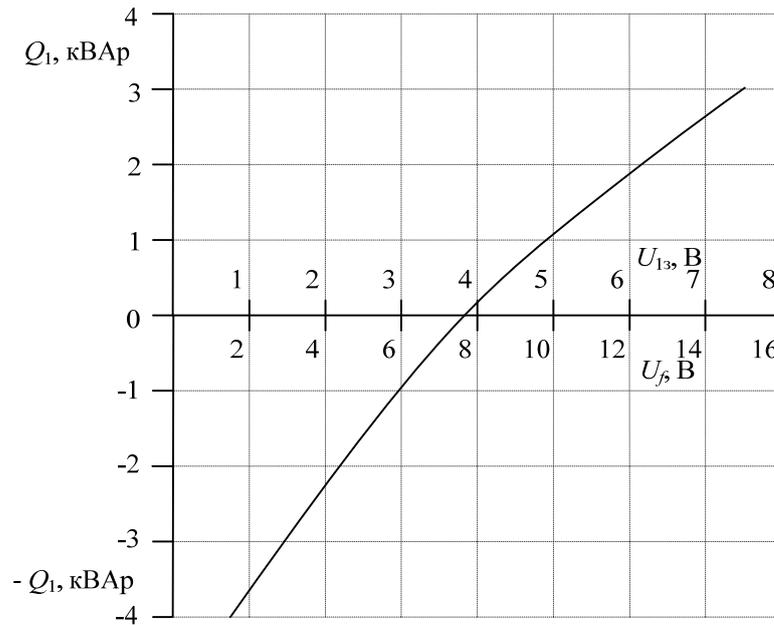


Рисунок 4.13 – Зависимость реактивной мощности синхронного электродвигателя от напряжения возбуждения  $U_f$  и от напряжения задания при  $k_M = 1 \text{ кА}^{-1}$  и  $P_{\Sigma 1} = 4 \text{ кВт}$ .

При  $P_1 = 2 \text{ кВт}$ ,  $\Delta P_2 = 1,25 \text{ кВт}$ ,  $\Delta Q_2 = 1,25 \text{ кВАр}$ ,  $\Delta Q_1 = 1,67 \text{ кВАр}$ ,  $\text{tg } \varphi_3 = 0,3$  величина  $\Delta U_{13} = 4,1 \text{ В}$ ,  $\Delta Q_1 = 0,695 \text{ кВАр}$ .

Погрешность регулируемой величины коэффициента РМ –  $\Delta \text{tg } \varphi = 0,012$  определяется в основном погрешностью датчиков мощности ( $\delta_M = 0,022$ ), так как основная погрешность от изменения  $\Delta Q_2$  и  $\Delta P_2$  полностью скомпенсирована.

#### 4.4 Выводы по четвертой главе

4.4.1. Показано, что методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным использована для определения дополнительного превышения температуры обмоток статора электродвигателя А-113-4М при пуске и самозапуске асинхронного электропривода водяного насоса СЭ 1250-70, что подтверждается актом внедрения.

4.4.2. Показано, что расчетные переходные характеристики разомкнутого синхронного электропривода – зависимость угла нагрузки от тока возбуждения, мощности нагрузки, напряжения питания – с погрешностью не более 5,5% в статике и 8,9% в динамике совпадают с экспериментальными переходными характеристиками.

4.4.3. Расчетные динамические характеристики синхронного электропривода с обратной связью по реактивной мощности с погрешностью не превышающей 9% совпадают с экспериментальными.

4.4.4. Погрешность системы управления коэффициентом РМ СЭС в установленном режиме составляет 2,2%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель синхронного электродвигателя в виде структурной схемы с передаточными функциями типовых звеньев, отличающаяся от известных моделей наличием в ней элементов, учитывающих колебания напряжения в сети.

2. Разработана математическая модель обобщенной СЭС как объекта управления параметрами ее режима, отличающаяся от известных моделей учетом асинхронной и конденсаторной нагрузок, активных сопротивлений линии электропередачи и трансформаторов, а также учетом нестабильности напряжения в электрической сети.

3. Разработана методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным, на базе которой построена методика расчета активной и реактивной мощности при его разгоне. Усредненная величина погрешности методики расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя не превышает 2%. Погрешность методики расчета активной и реактивной мощности, неучитывающей влияние электромагнитных процессов, составляет 3,8%.

4. Разработана методика расчета приращений реактивной мощности для различных режимов работы синхронного двигателя при колебании напряжения в сети. В номинальном режиме погрешность методики равна 3,5%.

5. Установлено, что погрешность системы управления коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом с отрицательной обратной связью по реактивной мощности синхронного двигателя и компенсирующей связью по активной и реактивной мощности асинхронной нагрузки меньше погрешности альтернативных систем управления с другими обратными связями и составляет  $\Delta \text{tg } \varphi_{\Sigma} = 0,0075$ , что значительно меньше заданного значения.

6. Разработана САУ коэффициентом РМ с синхронным электроприводом, применение которой позволило понизить тарифный коэффициент на электроэнер-

гию на 2,9% и тем самым получить экономический эффект от участия в регулировании реактивной мощности в размере 1,5 млн. рублей в год.

7. Исследования динамических характеристик системы управления коэффициентом РМ системы электроснабжения на экспериментальной установке с синхронным двигателем номинальной мощностью  $P_n = 5$  кВт с обратной связью по его реактивной мощности и компенсирующей связью по мощности асинхронной нагрузки показали, что отклонение расчетных значений угла нагрузки и реактивной мощности синхронного двигателя от экспериментальных не превышает в статике 6%, в динамике – 9%, а погрешность регулирования коэффициента реактивной мощности – 2,2%.

### **Рекомендации**

Результаты проведенных научных исследований рекомендуется внедрять на нефтяных промыслах, а также на промышленных предприятиях химической, металлургической, металлообрабатывающей и других отраслях промышленности в системах электроснабжения которых имеются синхронные и асинхронные электродвигатели.

Методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным рекомендуется к внедрению в соответствующих проектных и пуско-наладочных организациях при: выборе уставок в схемах защиты от многофазных замыканий и замыканий на землю; расчетах пусковых токов и продолжительности разгона электропривода; моделировании переходных режимов и т.д.

Основные результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при проведении лекционных и лабораторных занятий по дисциплинам электротехнических специальностей в технических учебных заведениях страны.

### **Перспективы дальнейшей разработки проблемы**

Дальнейшая разработка темы может быть направлена на создание систем управления параметрами режима системы электроснабжения:

- в состав которых входят несколько синхронных двигателей с регулируемым возбуждением;
- с управлением возбуждения синхронных двигателей в функции реактивной мощности асинхронных и синхронных двигателей, участвующих в режимах пуска и самозапуска;
- с дискретно-непрерывным алгоритмом управления, когда на время интенсивного потребления реактивной мощности, параллельно с синхронными двигателями, включается емкостная нагрузка;
- синтезированная по различным критериям оптимальности (минимуму суммарных потерь электрической энергии, минимуму отклонения нескольких параметров и т.д.).

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Абрамович Б.Н., Коновалов Ю.В. Дополнительные потери активной мощности в комплексах синхронный двигатель – система возбуждения при работе их в режиме компенсатора реактивной мощности // Промышленная энергетика. – 1988, №4. – С. 55.
2. Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отделение, 1983. – 128 с.
3. Амосов А.А. Дубинский Ю.А., Кончюва А.В. Вычислительные методы для инженеров. М.: Высшая школа, 1994. – 544 с.
4. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость / Пер. с англ. под ред. Я.Н. Лучинского. – М.: Энергия, 1980. – 568 с.
5. Андриевский Б.Р., Фрадков А.А. Избранные главы ТАУ с примерами на языке Matlab. СПб.: Наука, 1999. – 467 с.
6. Баркан Я.Д. Автоматизация режимов по напряжению и реактивной мощности: Из опыта Латвглавэнерго. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
7. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория степени автоматического управления. СПб: Профессия, 2003. – 752 с.
8. Бжелич С., Желич Н. Автоматическое вторичное управление напряжением и реактивной мощностью на многопараметрической основе // Электричество – 1995, №6. – С. 2-13.
9. Бишоп Р., Дорф Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний. Юнимедиастилл, 2002. – 831 с.
10. Ботвинник М.М. Регулирование возбуждения и статическая устойчивость инженерных машин. Госэнергоиздат, 1950.
11. Бояр-Созонович С.П., Гинтул Н.В., Кузнецов А.А. Автоматический регулятор коэффициента мощности // Промышленная энергетика. – 1989, №8. – С.47.

12. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Учеб. для энергет. спец. вузов. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
13. Вершинин П.П., Бугаенко А.В., Цыганок А.Г. Повышение эффективности использования синхронных двигателей для компенсации реактивных нагрузок // Промышленная энергетика. – 1989, №9. – С.38.
14. Возбудители серии ТЕ8-320. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Л., 1981. – 195с.
15. Возбудители серии ТЕ8-320-5. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Л., 1981. – 195с.
16. Воронов А.А., Титов В.К., Новогранов Б.Н. Основы теории автоматического регулирования и управления. М.: Высшая школа, 1977.
17. Гамазин С.И. Самозапуск электрических двигателей. М.: МЭИ - 1979. - 68с.
18. Герценберг Г.Р. Автоматический регулятор возбуждения для генераторов с ионной системой возбуждения Волжской ГЭС им. В.И. Ленина // Вестн. электропромышленности. – 1961, №6. – С. 11-16.
19. Глебов И.А., Логинов С.И. Системы возбуждения и регулирования синхронных двигателей. - Л.: Энергия, 1972. – 113с.
20. Глебов И.А., Серый Н.С. Влияние параметров гидрогенераторов на устойчивость электропередачи // Известия А СССР. Энергетика и автоматика 1960, №5 – с. 3-14.
21. Груздев И.А., Шахаева О.М. Системы автоматического регулирования возбуждением синхронных генераторов. Л. ЛПИ, 1978. – 79 с.
22. Голубовский А.В. Оптимизация и повышение энергоэффективности электроприводных КС МГ. / Г.Р. Шварц, А.В. Голубовский, В.А Мигачева, Ф.Н. Рассказов // Газовая промышленность. – 2005. - №12. – с. 76-77.
23. Горев А.А. Переходные процессы синхронных машин. Госэнергоиздат, 1950. – 419 с.
24. Гридин В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным. // Электричество. – 2012. - №5. – С. 40-44.

25. Дубинин Д.Ф. Модернизация схемы пуска тиристорных возбуждителей типа ТЕ8-320 // Промышленная энергетика. 1982, №1. – С. 21-22.
26. Дубинин Д.Ф. Опыт модернизации регулятора тиристорных возбуждителей серии ТЕ8-320 // Промышленная энергетика. 1983, №6. – С.13-16.
27. Дубинский Е.В., Компенсация Е.А. Анализ влияния степени компенсации реактивной мощности, потребляемой от источника питания, с учетом статических характеристик нагрузки // Промышленная энергетика. – 1996, №4. - С.35.
28. Дубинский Е.В., Конюхова Е.А. Определение степени компенсации реактивной мощности при заданных диапазонах уровней напряжения в узлах электрических сетей 10/0,4 кВ по условию уменьшения потребления активной мощности от источника питания. // Промышленная энергетика – 1996, №8 – с. 38.
29. Жданов П.С. Устойчивость электрических систем. Госэнергоиздат, 1948. – 531с.
30. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М.: Электроатомиздат, 1995. – 240с.
31. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
32. Иванов Б.П. Выбор возбуждения синхронного двигателя, обеспечивающего компенсацию реактивной мощности при резкопеременной нагрузке // Промышленная энергетика. – 1986, №7. – С. 49.
33. Иванов Г.М., Левен Г.М., Хуторецкий В.М. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока: - М.: Энергия. – 1960.
34. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины / Иванов-Смоленский А.В. – [3-е изд., стереот.]. – М: Издательский дом МЭИ, 1980. – Т. 1. – 2006. – 652 с.
35. Иносов В.В., Кружикова В.Е., Калинова В.А. Синхронные двигатели с возбуждением от полупроводниковых выпрямителей, ГИТЛ. УССР, Киев, 1960. – 315с.
36. Карпов Ф.Ф., Солдаткина Л.А. Регулирование напряжения в электрических сетях промышленных предприятий. М.: Энергия, 1970. – 294с.

37. Качин С.И. Автоматизированный электропривод: учеб.-метод. Пособие / С.И. Качин, А.Ю. Чернышев, О.С. Качин. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 162с.
38. Кирилин И.В. Выбор средств управления реактивной мощностью в системах электроснабжения предприятий цветной металлургии [текст] / И.В. Кирилин, П.М. Козлов. // Ежемесячный производственно-технический журнал «Промышленная энергетика». – 2010. №8. – С. 46-52.
39. Кирилин И.В. Создание имитационной модели для выявления искажений форм кривых токов и напряжения в сетях рудников [текст] / И.В. Кирилин, А.А. Массов, П.М. Козлов // Ежемесячный производственно-технический журнал «Промышленная энергетика» - 2011. - №5.
40. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Пер. с нем. М.Л.: Госэнергоиздат, 1963, 735с.
41. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов. – СПб: Энергоатомиздат, 1994.
42. Коновалов Ю.В. Моделирование электромеханических процессов в синхронном двигателе. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование: Издательство ИрГУПС. Г. Иркутск. №4(32), 2011. с. 84-89. Паспортизация электрических нагрузок нефтегазодобывающих предприятий. Устинов Д.А., Коновалов Ю.В., Плотников И.Г. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование: Издательство СПбГПУ, г. Санкт-Петербург, №1(142), 2012. с. 81-84.
43. Коновалов Ю.В. Исследование пуска электроприводов с двигателями переменного тока. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование: Издательство ИрГУПС, г. №4(36), 2012. с. 142-149.
44. Коновалов Ю.В. Математическое моделирование процесса пуска электродвигателей переменного тока. Вестник СГТУ: Издательство СГТУЮ г. Саратов. №4(68) 2012. с. 146-149.

45. Костенко М.П., Каштелян В.Е., Серый Н.С., Герценберг Г.Р. Регулирование напряжения и устойчивость при параллельной работе генераторов электростанций на две энергосистемы // *Электричество*. – 1959, №12. – С. 1-10.
46. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х частях. Ч. 2 Машины переменного тока. – Л.: Энергия, 1973.
47. Котенев В.И., Кочетков В.В., Осипов В.С. Определение параметров схем замещения асинхронных электродвигателей с фазным и короткозамкнутым ротором. // *Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия «Технические науки»*. – 2013. -№3(39). – С. 175-184.
48. Котенев А.В., Котенев В.И., Кочетков В.В. Определение сопротивлений короткозамкнутого асинхронного двигателя по каталожным данным. // *Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия «Технические науки»*. – 2016. -№1(49). – С. 103-109.
49. Котенев В.И., Кочетков В.В., Рубенин И.С., Севрюгин К.В. Обобщенная модель синхронной машины в системе управления ее возбуждением. // *Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. Тез. докл. II Междунар. науч.-тех. конф. студ., магистр., аспирантов*. – Тольятти, 2012. – С. 61-64.
50. Котенев В.И., Котенев А.В., Осипов В.С., Кочетков В.В. Математическая модель синхронной машины при управлении ее возбуждением. // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия технические науки, Ч. 2* – 2012. – С. 127–135.
51. Котенев В.И., Котенев А.В., Кочетков В.В. Структурная схема синхронного электродвигателя без гибкой связи по углу нагрузки. // *Состояние и перспективы развития электротехнологии. Тез. докл. Междунар. науч.-тех. конф. XVII Бенардосовские чтения, III том, электроэнергетика*. – Иваново, 2013. – С 72-73.
52. Котенев В.И., Котенев А.В., Кочетков В.В. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным. // *Известия высших учебных заведения. Электромеханика, вып. 6* – 2016. – С. 13-17.

53. Котенев В.И., Кочетков В.В. Дискретно-аналоговая система управления напряжением узла нагрузки электрической системы. // II Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в энергетике»: сборник статей, вып. II, Пенза, 2014 – С. 71-75.
54. Котенев В.И., Кочетков В.В. Обобщенная модель системы электроснабжения при управлении параметрами ее режима. // Известия высших учебных заведения. Электромеханика, вып. 5 – 2014. – С. 103-106.
55. Котенев В.И., Кочетков В.В. Обобщенная функциональная схема системы автоматического управления параметрами режима системы электроснабжения изменением реактивной мощности синхронного двигателя и статических компенсирующих устройств. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия технические науки, Ч. 4 (44) –2014. – С. 122-129.
56. Котенев В.И., Кочетков В.В., Петров В.В. Моделирование системы автоматического управления напряжением системы электроснабжения с короткозамкнутыми асинхронными двигателями. // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VI международной научно-практической конференции, Саратов, 2015 – С. 126-127.
57. Кочетков В.В. Шишков А.Г. Комплексная система автоматического управления параметрами узла нагрузки системы электроснабжения. В сб.: X Международная молодежная научная конференция "Тинчуринские чтения", т. 1 – Казань, 2015 – С. 87-88.
58. Котенев В.И., Кочетков В.В., Елькин Д.А. Математическая модель синхронного двигателя в электрической сети с нестабильным напряжением. // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII международной научно-практической конференции – Саратов, 2016 – С. 105-106.
59. Кочетков В.В. Математическая модель синхронного двигателя как объекта управления его реактивной мощностью. // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. Тез. докл. III Всеросс. науч.-тех. конф. студ., магистр., аспирант. – Тольятти, 2014. – С. 203-205.

60. Кочетков В.В. Изменение мощности и напряжения в узле нагрузки электрической системы при пуске асинхронного двигателя с учетом понижения напряжения в сети. // Материалы докладов XX аспирантско–магистерского семинара, посвященного «Дню энергетика», т. 1 – Казань, 2016 – С. 25-28.
61. Кочетков В.В. Управление возбуждением синхронного двигателя на постоянство реактивной мощности узла нагрузки электрической системы. // Материалы докладов XX аспирантско–магистерского семинара, посвященного «Дню энергетика», т. 1 – Казань, 2016 – С. 28-31.
62. Кравчик А.Э. и др. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. – М: Энергоатомиздат, 1982. – 425с.
63. Лазарев Ю. Matlab 5. Киев: Ириша, ВНУ, 2000, 381с.
64. Лыкин А.В. Электрические системы и сети . – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 254 с.
65. Леоненко С.С., Дмитриев Е.А. Регулятор коэффициента мощности для синхронных двигателей компрессоров // Промышленная энергетика. – 1991, №11. – С. 50.
66. Литвак В.В. Влияние снижения напряжения на реактивную мощность синхронных двигателей при нормальном возбуждении, от «Синхронные двигатели», 1959.
67. Лищенко А.И. Синхронные двигатели с автоматическим регулированием возбуждения. – Киев: Техника, 1969. – 192 с.
68. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным. // Вектор науки Тольяттинского Государственного Университета. – 2013. - №1(23). – С. 108-112.
69. Матюхин В.М. Уравнение и структурная схема синхронного генератора при автоматическом регулировании возбуждения. Изв. АН СССР, ОТН. №9, 1952.
70. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях. – М.: Энергия, 1975. – 128с.
71. Меньшов Б.Г., Суд И.И., Яризов А.В. Электрооборудование нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1990. – 365с.

72. Методы классической и современной теории автоматического управления, под редакцией Г.А. Пупкова, Е.Д. Егупова. .: Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2004, Т1-5.
73. Михайлов В.В., Овчинников В.В., Салютин А.А. Оценка технико-экономической эффективности устройств компенсации реактивной мощности в условиях рыночных отношений // Промышленная энергетика. – 1995, №7. – С. 41.
74. Михневич Г.В. Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин. Изд-во Наука, М, 1963. – 233с.
75. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. // Электричество. – 1988 - №4. – С. 38-42.
76. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть станций и подстанций. М. Энергоатомиздат, 1989. – 608с.
77. Петелин Д.П. Автоматическое управление синхронными электроприводами. – М.: Энергия, 1968. – 193с.
78. Подорожнявый Б.Н. Программное управление возбуждением СД // Промышленная энергетика. – 1984, №6. – С. 34-37.
79. Решмин Б.М., Ямпольский Д.С. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. М.: Энергия, 1975. – 184с.
80. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 296.
81. Саушкин С.А., Махулин В.В. Кириллина О.И. Анализ состояния и перспективы реактивной мощности Норильской энергосистемы // Промышленная энергетика. – 1996, №9. – С. 41.
82. Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.А., Деркачев С.В. Определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей. // Электричество. – 2014. - №10. – С. 38-44.
83. Синхронные приводы. Корытин А.М., Бербенец И.И., Давиденко И.Х., Евдохин А.И., Зимненко В.Г., Кротенко А.М. – М.: Энергия, 1967. – 80с.

84. Сиунов Н.С., Тарасов Н.М. Синхронный двигатель с возбуждением от полупроводниковых выпрямителей, *Электричество*, 1959, №2.
85. Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
86. Слизский Э.П., Филатов А.Г., Лукаш Н.П. Синтез системы управления реактивной мощностью в узле нагрузки энергосистемы с мощными синхронными двигателями / Киев. политехн. Ин-т. – Киев, 1993. – 25с.
87. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. М.: Энергия, 1977. – 216с.
88. Справочник по теории автоматического управления под редакцией В.А. Крассовского. М.: Наука. 1987. – С. 712.
89. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 528с.
90. Трошин В.А. Об ограничении тока возбуждения синхронных двигателей // Изв. Вузов. Электромеханика. – 1967, №3. – С. 38-45.
91. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в энергетических системах. М.: Энергия, 1970 – 520с.
92. Усольцев А.А. Электрические машины. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013.
93. Филипс У., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. С. 615.
94. Федоров А.А., Старкова Л.Е. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368с.
95. Шварц Г.Р. Динамические характеристики синхронного двигателя при управлении реактивной мощностью // Приборы, системы информатика: Межвузовский сб. научн. тр. – Самара, 1997. – С. 41-45.

96. Шварц. Г.Р. Оптимальное управление возбуждением синхронных двигателей при случайных возмущениях // Автоматизация технологических процессов и производств. Точность, качество и надежность конструкций и технических систем. – Самара, 1997. – 29-31.
97. Шварц Г.Р. Оптимальное управление реактивной мощностью синхронных двигателей газоперекачивающих станций // Приборы, системы информатика: Межвузовский сб. научн. тр. – Самара, 1977. – С. 45-50.
98. Шварц И.Г. Об эффективной компенсации реактивной мощности промышленных установок // Промышленная энергетика. – 1992, №2. – С. 38-39.
99. Шварц Г.Р., Абакумов А.М., Мигачева Л.А., Рассказов Ф.Н., Кузнецов П.К. Применение регулируемого электропривода в технологиях транспорта газа и нефти. Книга 1-3, М.: Машиностроение, 2008. – 240с.
100. Шумилов В.Ф. Корреляционные функции и спектральные плотности случайных нагрузок промышленных установок // Электричество. – 1988, №2. – С. 34-37.
101. Шумилов В.Ф., Шумилова Н.И. Повышение качества компенсации реактивной мощности МДП-двигателями // Электр. ст. – 1995, №5. – С. 43-46.
102. Шумилов В.Ф., Шумилова Н.И. Повышение качества компенсации реактивной мощности в фильтрокомпенсирующих устройствах // Промышленная энергетика. – 1991, №12. – С. 45.
103. Шумилов В.Ф., Шумилова Н.И. Повышение качества компенсации реактивной мощности синхронными двигателями // Промышленная энергетика. – 1993, №7. – С. 41.
104. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. – СПб.: Наука. 1996 – 138с.
105. А. С. Семёнов. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MatLAB // ВЕСТНИК СВФУ, том 11, № 1. – 2014. – С. 51-59.
106. Adkins В. The General Theory of Electrical Machines. London: Chapman and Hall, 1964.
107. Anderson P.M. Analysis of Faulted Power Systems. Amos: Iowa State Univ., 1973.

108. Boglietti A., Cavagino A., Ferrari L. Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance. – IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, vol. 23, iss. 3, p. 796-803. – АНГЛ.
109. Carraro, M. and M. Zigliotto, 2014. Automatic Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors at Standstill. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 61(9): 4605 - 4613. – АНГЛ.
110. Chebbo A.M., Irving M., Dondachi N.H. Combined active reactive dispatch. Part 2. Test results // IEE Proc. Generat, Transmiss. And Distrib. – 1955. – 142, №4. – P. 401-405. - АНГЛ.
111. Chen Y. Embedded DSPs bring cost-effective high-performance solutions to appliance control // Electronic Engineering Times, 2 apr. 2001.-Pp. 78-82. – АНГЛ.
112. Concordia C. Synchronous Machines. N. V.: Wiley, 1951.
113. Concordia C. Synchronous Machine Damping and Synchronizing Torques. In: AIEE Trans. 70, 1951, p. 731—737.
114. Dandeno P. L., Hauth R. L., Schulz R. P. Effects of Synchronous Machine Modeling in Large-Scale System Studies. In: IEEE Trans. PAS-92, 1973, p. 574-582.
115. Fan, B., Z. Yang, W. Wei Xu and X. Wang, 2014. Rotor Resistance Online Identification of Vector Controlled Induction Motor Based on Neural Network. Mathematical Problems in Engineering, 2014. – АНГЛ.
116. Gyngyi Laszlo Dynamic compensation of ac transmission lines by Solid-state synchronous voltage sources // IEE Trans. Power. Deliv. – 1994, №2. – C. 904-911. – АНГЛ.
117. Harris M. R., Lawrenson P. J., Stephenson J. M. Per Unit Systems: With Special Reference to Electrical Machines. London: IEE (British) Monograph., Cambridge Univ. Press, 1970.
118. Kimbark E. W. Power System Stability. N.Y.: Wiley, vol. 1—3, 1956.
119. Kundur P., Dandeno P. L. Stability Performance of 555 MV-A Turboalternators. — Digital Comparisons with System Operating Tests. In: IEEE Trans. PAS-93, 1974, p. 767-776.

120. Liu J. Speed estimation of induction motor using a non-linear identification technique / Liu J., Kung I., Chao H. // Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A) Vol. 25, No. 2, 2001. - Pp. 107-114. – АНГЛ.
121. Liu Y. Multi-parameter Online Identification Algorithm of Induction Motor for Hybrid Electric Vehicle Applications. Parallel Architectures, Algorithm and Programming (PAAP), 2014 Sixth International Symposium, IEEE, pp. 35-39. – АНГЛ.
122. Lefschetz S. Stability of Nonlinear Control Systems. N. Y.: Academic Press, 1965.
123. Park R.H. Two Reaction Theory of Synchronous Machines. In: AIEE Trans. 48, pt 1, 1929, p. 716-730.
124. Park R.H. Two Reaction Theory of Synchronous Machines. In: AIEE Trans. 52, pt 2, 1933, p. 352-355.
125. Rowland L. / Nova open showease compressor station. – Oil weck. – 1990. – vol.41., №38. – p. 9-11. – АНГЛ.
126. Schulz R. P., Jones W. D., Ewart D. N. Dynamic Models of Turbine Generators Derived from Solid Rotor Equivalent Circuits. In: IEEE Trans. PAS-92, 1973, p. 926-933.
127. Watson W., Manchur G. Synchronous Machine Operational Impedances from Low Voltage Measurements at the Stator Terminals. In: IEEE Trans. PAS-93, 1974, p. 777-784.
128. Young C. C. Equipment and System. Modeling for Large-Scale Stability Studies. In: IEEE Trans. PAS-91, 1972, p, 99-109.
129. Kotenev V.I., Kochetkov V.V., Elkin D.A. The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan, 29-30 June, 2017 – IEEE Xplore, 2017. – АНГЛ.
130. Kotenev V.I., Kotenev A.V., Kochetkov V.V., Elkin D.A. Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability // Journal of Physics: Conference series, Volume 944, conference 1, doi:10.1088/1742-6596/944/1/012064, 2018.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Акт о внедрении результатов диссертационной работы Кочеткова В.В. «Совершенствование управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения с синхронным электроприводом» в Самарском государственном техническом университете.

Приложение 2. Акт внедрения в практику инженерного обслуживания КНС «Бариновская» методик расчета сопротивлений и пусковых характеристик асинхронных двигателей А113-4М, А114-4М и методики настройки регуляторов синхронного двигателя СТД-1250.

Приложение 3. Акт об использовании результатов диссертационной работы Кочеткова В.В. в АО «Самарская сетевая компания».

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе СамГТУ



О.В. Юсупова

20\_\_ г.

## АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Кочеткова В.В.  
«Совершенствование управления коэффициентом реактивной мощности системы  
электрообеспечения с синхронным электроприводом» в учебном процессе

Настоящий акт составили представители Самарского государственного технического университета:

- и.о. заведующего кафедрой «Электрообеспечение промышленных предприятий» Клочкова Н.Н.;
- профессор кафедры «Электрообеспечение промышленных предприятий» Зимин Л.С.;
- профессор кафедры «Электрообеспечение промышленных предприятий» Данилушкин А.И.;

о том, что результаты диссертационной работе Кочеткова В.В.:

- математическая модель обобщенной СЭС как объекта управления параметрами ее режима;

- методика определения сопротивлений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным и расчет реактивной и активной мощности при его разгоне;

- система управления коэффициентом реактивной мощности системы электрообеспечения с синхронным электроприводом с отрицательной обратной связью по реактивной мощности синхронного двигателя и компенсирующей связью по активной и реактивной мощности асинхронной нагрузки,

использованы в учебном процессе кафедры «Электрообеспечение промышленных предприятий» в лекционном материале и в лабораторном практикуме по дисциплине «Стационарные и переходные режимы в системах электрообеспечения», а также при выполнении выпускных квалификационных работ бакалаврами и магистрами кафедры.

И.о. зав. кафедрой «Электрообеспечение  
промышленных предприятий» \_\_\_\_\_

Клочкова Н.Н.

Профессор кафедры «Электрообеспечение  
промышленных предприятий» \_\_\_\_\_

Зимин Л.С.

Профессор кафедры «Электрообеспечение  
промышленных предприятий» \_\_\_\_\_

Данилушкин А.И.

«УТВЕРЖДАЮ»

Начальник ПРЦЭ и Э №2

АО "Самаранефтегаз"



## АКТ

внедрения в практику инженерного обслуживания КНС «Бариновская» методик расчета сопротивлений и пусковых характеристик асинхронных двигателей А113-4М, А114-4М и методики настройки регуляторов синхронного двигателя СТД-1250

Комиссия в составе:

- председатель: начальник ПРЦЭ и Э №2 АО "Самаранефтегаз" Мифтахов Р.М.
- члены комиссии: начальник ПРЦЭ и Э №2 СР №2 АО "Самаранефтегаз" Сарайкин Д.А.  
мастер ПРЦЭ и Э №2 СР №2 АО "Самаранефтегаз" Сывороткин О.В.

составили настоящий акт о том, что для КНС «Бариновская» разработаны:

- методика расчета сопротивлений и пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором – использована для определения величины превышения номинальной температуры обмоток и допустимого времени перегрузки при пуске асинхронных двигателей А113-4М, А114-4М;
- методика расчета и настройки регуляторов систем управления возбуждением синхронных двигателей – использована для настройки системы управления синхронного двигателя СТД-1250;

разработанные авторским коллективом Самарского государственного технического университета в составе: Кочетков В.В., Копылов С.В., Елькин Д.А., под руководством профессора Котенева В.И.

Комиссия постановила:

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

начальник ПРЦЭ и Э №2 АО "Самаранефтегаз"  Мифтахов Р.М.

начальник ПРЦЭ и Э №2 СР №2 "Самаранефтегаз"  Сарайкин Д.А.

мастер ПРЦЭ и Э №2 СР №2 "Самаранефтегаз"  Сывороткин О.В.



## АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «САМАРСКАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ»

Место нахождения:  
443079, Россия, Самара, ул. Гагарина, 22  
тел.: (846) 342-60-00, факс: 342-60-01  
e-mail: office@ssk63.ru

ОГРН 1056367019136  
ИНН 6367047389  
КПП 631050001

Исх № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор АО «ССК»



А.Д. Кучканов

2017 г.

АКТ

об использовании результатов  
диссертационной работы Кочеткова Владимира Валерьевича

«Совершенствование управления коэффициентом реактивной мощности системы  
электрообеспечения с синхронным электроприводом»

Комиссия в составе:

- председатель комиссии: заместитель технического директора АО «ССК» А.Ф. Казанцев;
- члены комиссии: заместитель технического директора – начальник производственно-технической службы Е.А. Кузнецов, зам. директора по развитию М.В. Романов;

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы В.В. Кочеткова, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в работе по развитию и повышению энергоэффективности электрических сетей Акционерного общества «Самарская сетевая компания».

Комиссией решено рекомендовать к внедрению предложенные В.В. Кочетковым системы управления переменными синхронного двигателя и узла нагрузки системы электрообеспечения, в частности систему регулирования возбуждения синхронного двигателя СТД-1250 на постоянство коэффициента реактивной мощности узла нагрузки.

Председатель комиссии \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ А.Ф. Казанцев

Члены комиссии: \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ Е.А. Кузнецов

\_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ М.В. Романов