

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЕГАЗОВЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ, ИНФОРМАТИКИ И СВЯЗИ  
Кафедра «Электроэнергетика»

## **РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Методические указания к выполнению контрольной работы  
по дисциплине «Переходные процессы  
в электроэнергетических системах  
с распределенными параметрами»  
для студентов направления  
140400.62 «Электроэнергетика и электротехника»  
профиль «Электроснабжение»  
дистанционной формы обучения

Составитель: Г.А. Хмара

Тюмень  
ТюмГНГУ  
2015

Расчет устойчивости электроэнергетической системы [Текст]: методические указания к контрольной работе для студентов направления 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электроснабжение» дистанционной формы обучения / сост. Г.А. Хмара; Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень: Издательский центр БИК, ТюмГНГУ, 2015. – 30 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры «Электроэнергетика» «05» мая 2015 г, протокол №10.

### **Аннотация**

Методические указания к контрольной работе по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах с распределенными параметрами» на тему «Расчет устойчивости электроэнергетической системы» предназначены для студентов, обучающихся по направлению 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника». Данная дисциплина изучается в двух семестрах.

Приведено содержание основных разделов, требования к оформлению, задание, методика выполнения, вопросы для подготовки к защите контрольной работы.

# ВВЕДЕНИЕ

## 1 Цели и задачи дисциплины:

*Целью* дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах» является формирование у студентов представлений о всем комплексе сложных вопросов и проблем, связанных с переходными процессами в электрических сетях и системах электроснабжения, научить производить необходимые расчеты с целью выбора уставок релейной защиты, обеспечивать протекания переходных процессов с минимальными отрицательными воздействиями на систему, как в нормальных, так и аварийных условиях эксплуатации электрооборудования.

### *Задачи* дисциплины:

- ознакомить студентов с причинами появления и возможных последствий переходных процессов на работоспособность элементов системы, изменение их режимных параметров;
- усвоить технологии и назначение расчетов коротких замыканий в электроэнергетике;
- владеть методами расчета переходных процессов в зависимости от решаемой конкретной задачи проектирования системы;
- усвоить методы анализа переходных процессов, вызванных аварийными ситуациями.

## 2 Место дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина относится к циклу БЗ профессиональный цикл дисциплин.

Входными знаниями для изучения дисциплины является Высшая математика (Интегральное и дифференциальное исчисление, Матричный метод расчета уравнений, Решения дифференциальных уравнений, Методы решения нелинейных дифференциальных уравнений и т.д.), Физика (Электричество и магнетизм), Теоретические основы электротехники, Электромеханика, Электрические сети и системы.

Дисциплина является предшествующей для выполнения Выпускной квалификационной работы.

## 3 Требования к результатам освоения дисциплины:

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

Код компетенции	Название компетенции
ПК	<b>Профессиональные компетенции выпускника</b>
	<i>общепрофессиональные</i>
ПК-8	готов участвовать в работе над проектами электроэнергетических и электротехнических систем и отдельных их компонентов
ПК-11	способен использовать методы анализа и моделирования линейных и нелинейных электрических цепей постоянного и переменного тока
ПК-15	способен рассчитывать схемы и элементы основного оборудования, вторичных цепей, устройств защиты и автоматики электроэнергетических объектов
ПК-16	способен рассчитывать режимы работы электроэнергетических установок различного назначения, определять состав оборудования и его параметры, схемы электроэнергетических объектов
ПК-18	способен использовать технические средства для измерения основных параметров электроэнергетических и электротехнических объектов и систем и происходящих в них процессов
ПК-23	готов определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса по заданной методике

Цель контрольной работы – закрепить и систематизировать знания, полученные по дисциплине, а также в смежных дисциплинах; научить студентов применять эти знания при решении инженерных задач; привить им навыки самостоятельной творческой работы.

В процессе выполнения данной работы приобретаются навыки исследования статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем, появляется готовность участвовать в работе над проектами электроэнергетических и электротехнических систем и отдельных их компонентов (ПК-8); способность рассчитывать режимы работы электроэнергетических установок различного назначения, определять состав оборудования и его параметры, схемы электроэнергетических объектов (ПК-16); готовность определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса по заданной методике (ПК-23).

# 1 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

## 1.1. Требования к структуре контрольной работы

Контрольная работа (КР) должна включать в указанной последовательности:

- титульный лист на одной странице (см. приложение 1);
- задание на КР на двух сторонах одного листа (см. приложение 2);
- содержание на 1 странице;
- введение на 1 странице;
- основная часть – 10-15 страниц;
- заключение на одной странице;
- список использованных источников на 1 странице.

**Введение** должно в краткой форме отражать современное состояние рассматриваемого вопроса, обосновывается необходимость его решения, актуальность применяемых методик, связь с производственными задачами и обобщенную цель КР.

**Основная часть** включает основные сведения об объекте моделирования, краткое описание применяемых методик, основные расчеты и их результаты, анализ результатов расчетов, выводы, описания и обоснования принятых решений.

**Заключение** должно отражать основные результаты работы, содержать оценку его соответствия заданию, выводы по принятым решениям. Объем заключения не должен превышать одной страницы.

**Список использованных источников** выполняется согласно ГОСТ 7.82-2001, ГОСТ 7.1-2003, ГОСТ Р 7.0.5-2008. Источники следует располагать по алфавиту. Ссылки на литературные источники в тексте записки целесообразно делать лишь в тех случаях, когда источник содержит оригинальные сведения, новые нормативы, специальные формулы, схемы и т.п. При ссылке нужно указать в квадратных скобках тот порядковый номер, который источник имеет в списке литературы, приводимом в конце пояснительной записки.

В текст пояснительной записки следует включать не весь первичный материал, а лишь ту его часть, которая необходима для полноты восприятия проделанной работы. При необходимости вспомогательный материал может быть вынесен в **приложения**. В приложения следует включать программы расчетов на ЭВМ, промежуточные расчёты, таблицы вспомогательных цифровых данных.

Содержание основных разделов контрольной работы приведено в табл. 1.

Таблица 1

## Содержание разделов контрольной работы

№ п/п	Содержание основных разделов контрольной работы	Доля от всей работы, %	Объем выполненной работы, %
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
1	Введение	10	10
2	Расчет статической устойчивости электроэнергетической системы методом малых колебаний. Выбор параметров системы, при которых система будет устойчива с запасом не менее 20% по активной мощности.	40	50
3	Расчет динамической устойчивости электроэнергетической системы при внезапном коротком замыкании в указанной точке методом площадей. Определение предельного времени отключения короткого замыкания методом последовательных интервалов.	40	90
4	Заключение	10	100
5	Окончательное и оформление контрольной работы		
6	Подготовка к защите и защита контрольной работы		

Каждое приложение начинается с новой страницы и имеет тематический заголовок. В верхнем правом углу пишется слово «Приложение» и (если в работе более одного приложения) указывается его номер арабскими цифрами, например: ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Если одно приложение составляет более одной страницы, то на последующих его страницах в правом верхнем углу пишется: Продолжение приложения 3. При этом нумерация страниц должна быть сквозной по всей работе.

## 1.2. Требования к оформлению контрольной работы

Контрольная работа выполняется на стандартных листах писчей бумаги формата А4 (210х297) мм по ГОСТ 2.105-95.

Текст располагается на одной стороне листа А4 (210х297). Междустрочный интервал – полуторный, размер букв основного текста - 14pt, цвет – черный, гарнитура – Times New Roman.

Поля: слева – 25мм, снизу 25 мм, сверху – 15 мм, справа – 10 мм.

Сокращения русских слов и словосочетаний в тексте выполняется по ГОСТ Р 7.0.12-2011, на иностранных языках – по ГОСТ 7.11-2004.

Размеры в формулах: обычный - 16pt, крупный индекс - 9pt, мелкий индекс - 7pt, крупный символ - 24pt, мелкий символ - 16pt. Все латинские буквы (за исключением названий функций) набираются курсивом. Текст набирается в редакторе Word for Windows шрифтом Times New Roman.

Расстояние от края до колонтитула: верхнего – 5 мм; нижнего – 17 мм, при этом расстояние от нижнего края страницы до её номера будет не менее 10 мм.

Расстояние между заголовком и текстом, между заголовками раздела и подраздела, между текстом и формулой – два межстрочных интервала.

Номер страницы ставится внизу в её центре. Все страницы нумеруются, начиная с титульного листа. На титульном листе, на листах задания, содержания номера не проставляются.

Форматирование текста – «по ширине», за исключением заголовков и подзаголовков, которые форматируются «по центру».

Текст делится на разделы, которым присваиваются порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами. Наименование раздела записывается прописными буквами. Например,

## 1. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Разделы, в свою очередь, делятся на подразделы. Номер подраздела состоит из двух чисел: первая – номер раздела, в который входит подраздел; второе – номер подраздела в данном разделе. Например,

### 2.2. Расчет динамической устойчивости электро-энергетической системы методом площадей

Заголовки подразделов записываются строчными буквами. Точка в конце заголовков не ставится. Подчеркивать заголовки не допускается.

В тексте документа не допускается:

- применять обороты разговорной речи;
- применять произвольные словообразования;
- применять сокращение слов, кроме установленных правилами русской орфографии, пунктуации;
- сокращать обозначения физических единиц (СИ).

Формулы нумеруются арабскими цифрами в пределах раздела. Номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы в разделе, разделённых точкой. Номер указывают с правой стороны листа напротив формулы в круглых скобках, например, (2.4) - четвертая формула второго раздела. Формулы выравниваются по центру.

В процессе расчета необходимо привести формулу, подставить в нее числовые значения буквенных обозначений и записать готовый ответ без промежуточных вычислений. При многократно повторяющихся однотипных расчетах нужно привести расчетную формулу, дать один пример расчета, а результаты последующих расчетов свести в таблицу.

Значение символов и числовых коэффициентов должны расшифровываться непосредственно под формулой в той последовательности, в какой

они даны в формуле. Значение каждого символа следует давать с новой строки. Первую строку начинают со слова «где», двоеточие после него *не* ставят.

Уравнения и формулы следует выделять из текста свободными строками. Перенос в формулах разрешается только после арифметических знаков (равно, плюс, минус, умножить и т.п.).

Обозначение единиц физических величин следует помещать только после конечного результата вычисления в круглых скобках.

Таблицы нумеруются последовательно арабскими цифрами в пределах раздела. В правом верхнем углу таблицы над соответствующим заголовком помещают надпись «Таблица» с указанием номера таблицы. После номера таблицы точка не ставится. Номер таблицы должен состоять из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой, например,

Таблица 1.2

Название таблицы			
Заголовок 1	Заголовок 2	Заголовок 3	
		подзаголовок 3.1	подзаголовок 3.2
1	2	3	4
текст	текст	текст	текст

(вторая таблица первого раздела). При переносе части таблицы на другие страницы, над ними пишут слово «продолжение», например,

Продолжение табл. 1.2

1	2	3	4
текст	текст	текст	текст

Таблицы имеют горизонтальное деление (строки) и вертикальное (столбцы или колонки). В верхней строке таблицы указываются наименования (заголовки и подзаголовки) граф-столбцов таблицы. Заголовки граф начинают с прописных букв, а подзаголовки - со строчных, если они составляют одно предложение с заголовками. Если же подзаголовок представляет собой самостоятельное предложение, то его начинают с прописной буквы. Заголовки строк располагают в крайней левой колонке таблицы и начинают с прописных букв. Графу «№ п/п» в таблицу не включают. При необходимости порядковый номер указывается слева перед началом соответствующей горизонтальной строки арабскими цифрами и отделяется точкой.

В тексте пояснительной записки должна быть сделана ссылка на таблицу. Например: «Результаты расчетов сведены в табл. 2.7».

Все иллюстрации (схемы, графики, рисунки, диаграммы и т.д.), поясняющие текстовую часть пояснительной записки, именуется рисунками. Они обозначаются словом «Рис.» и нумеруются последовательно арабскими цифрами в пределах раздела. Номера рисунков формируются аналогично номерам таблиц и формул. После номера рисунка следует подрисуночная надпись. Например,



## Рис. 2.2. Угловая характеристика генератора

Все кривые (если их на рисунке несколько) на каждом рисунке должны быть пронумерованы. Расшифровка может быть выполнена в тексте либо в подрисуночной надписи. В последнем случае после названия рисунка ставится двоеточие и через дефис дается пояснение, что означает каждая кривая. Ссылки на рисунки оформляются так же, как и на таблицы.

Рисунки и таблицы следует помещать сразу же после того, как они впервые упомянуты в тексте и не далее, чем на следующей странице.

Решение об аттестации принимают только после представления отчетной работы в установленный срок в оформленном виде.

## 2. ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

*Цель работы:*

- изучить способ определения статической устойчивости ЭЭС методом малых колебаний и изучить критерии устойчивости;
- изучить методы определения динамической устойчивости ЭЭС при больших возмущениях.

### 2.1. Задание на контрольную работу

Проанализировать статическую устойчивость электроэнергетической системы, изображенной на рисунке 2.1.

- а) по характеристическому уравнению движения ротора генератора произвести D-разбиение по неизвестным параметрам системы;
- б) отметить на плоскости решений области устойчивости;
- в) выбрать параметры элементов системы, при которых система будет статически устойчивой;
- г) построить угловую характеристику генератора по полученным параметрам системы, отметить исходный режим и определить запас статической устойчивости по активной мощности.

При внезапном однофазном металлическом коротком замыкании  $K^{(1)}$ , произошедшем в указанной точке разработанной электроэнергетической системы, переходящим в двухфазное короткое замыкание на землю  $K^{(1,1)}$  через время  $t_1$ , что соответствовало углу нагрузки  $\delta_1 = 1,1\delta_0$  рад, которое в свою очередь через  $t_2$ , что соответствовало углу нагрузки  $\delta_2 = 1,2$  рад, перешло в трехфазное короткое замыкание  $K^{(3)}$ , после чего поврежденный участок был отключен ближайшим выключателем при угле нагрузки  $\delta_3 = 1,35$  рад (общее время переходного процесса составило  $t_\Sigma$ )

- а) проанализировать динамическую устойчивость электроэнергетической системы методом площадей;

б) определить предельное время отключения переходного процесса  $t_{\Sigma}$  методом последовательных интервалов.

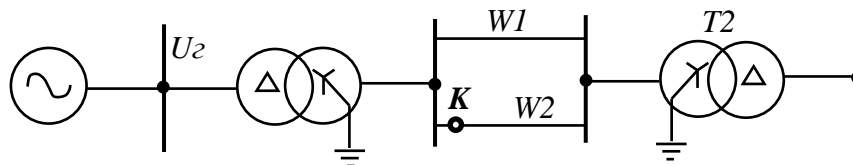


Рис. 2.1. Однолинейная принципиальная схема электроэнергетической системы

## 2.2. Указания к расчетам

Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.1. При расчетах необходимо принять ряд допущений:

1) Момент инерции паровых турбин принять равным 150% момента инерции присоединенного к ним турбогенератора, момент инерции гидротурбин принять равным 10% момента инерции присоединенного к ним гидрогенератора.

2) Потери мощности демпферной обмотки генераторов мощностью до 1000 кВт составляют 0,5% от номинальной мощности генератора, свыше 1000 кВт – 0,25%.

3) Погонное сопротивление линий номинального напряжения до 220 кВ принимать равным 0,4 Ом/км, напряжения 330 кВ – 0,325 Ом/км, напряжения 500 кВ – 0,307 Ом/км. Среднее значения отношения сопротивления нулевой последовательности воздушной линии электропередач к прямой  $X_0/X_1$  принимать равной для одноцепной без заземленных тросов – 3,5; то же со стальными заземленными тросами – 3,0; то же с заземленными тросами из хорошопроводящих материалов – 2,0; для двухцепной без заземленных тросов – 5,5; то же со стальными заземленными тросами – 4,7; то же с заземленными тросами из хорошопроводящих материалов – 3,0. Длину линий выбирать до 200 км при напряжении до 220 кВ и до 150 км при напряжении 330 и 500 кВ.

4) Напряжение короткого замыкания силовых трансформаторов номинального высшего напряжения 242 кВ принимать равным 11,5 %, напряжения 115 – 10,5 %. Номинальную полную мощность силового трансформатора  $T1$  принимать равной ближайшей номинальной полной мощности генератора из стандартного ряда мощностей трансформаторов. Номинальную полную мощность силового трансформатора  $T2$  принимать равной не менее номинальной полной мощности исходного режима.

5) Для регулирования возбуждением генераторов мощностью свыше 100 кВт используются системы Автоматического регулирования возбуждения пропорционального действия (АРВ-П), свыше 60 МВт – сильного действия (АРВ-С).

Таблица 2.1

## Исходные данные

Вариант	Тип генератора	Номинальные напряжения трансформатора T1, кВ	Номинальные напряжения трансформатора T2, кВ	Напряжение системы, кВ	Исходный режим, МВт/Мвар
1	2	3	4	5	6
1	ТВФ-110-2	10,5/115	115/10,5	10	100/60
2	ТВФ-120-2	10,5/115	115/10,5	10	110/75
3	ТЗФГ-160-2МУЗ	15,75/242	242/37,5	35	150/80
4	ТЗФП-160-2МУЗ	15,75/242	242/37,5	35	140/90
5	ТВВ-200-2	15,75/115	115/37,5	35	200/40
6	ТВВ-320-2	20/242	242/37,5	35	300/50
7	ТВМ-500	36,75/242	242/37,5	35	500/45
8	ТВВ-500-2Е	20/242	242/37,5	35	490/85
9	ТВВ-800-2Е	24/242	242/37,5	35	780/70
10	ТВВ-1000-2	24/242	242/37,5	35	950/150
11	ВГС-1525/135-120	10,5/115	115/10,5	10	50/12
12	ВГС-1260/147-68	13,8/115	115/10,5	10	110/20
13	ВГС-1260/200-60	15,75/242	242/37,5	35	150/45
14	СВ-660/165-32	10,5/115	115/10,5	10	60/8
15	СВ-1340/140-96	13,8/115	115/10,5	10	55/9
16	СВ-1130/140-48	13,8/115	115/10,5	10	110/22
17	СВ-850/190-48	16,5/242	242/37,5	35	105/35
18	СВ-1500/200-88	13,8/115	115/10,5	10	110/14
19	СВ-1500/175-84	15,75/242	242/37,5	35	120/24
20	СВФ-1500/130-88	13,8/115	115/10,5	10	62/16
21	СВФ-1690/175-64	15,75/242	242/37,5	35	240/60
22	СВФ-1285/275-42	15,75/242	242/37,5	35	750/120
23	ТВФ-110-2	10,5/115	115/10,5	10	100/24
24	ТВВ-200-2	15,75/242	242/37,5	35	195/26
25	ТВВ-320-2	20/115	115/10,5	10	300/95
26	ТВМ-500	36,75/242	242/37,5	35	490/100
27	ТВВ-500-2Е	20/242	242/10,5	10	500/45
28	ТВВ-800-2Е	24/242	242/10,5	10	795/20
29	ТВВ-1000-2	24/242	242/37,5	35	1000/200
30	СВ-660/165-32	10,5/115	115/37,5	35	40/16

### 3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

#### 3.1. Анализ статической устойчивости электроэнергетической системы

Характеристическое уравнение движения ротора при учете демпфирующих моментов в обмотке возбуждения генератора имеет вид

$$T_j T'_d \frac{d^3 \delta}{dt^3} + (T_j + P_d T'_d) \frac{d^2 \delta}{dt^2} + (C_2 T'_d + P_d) \frac{d\delta}{dt} + C_1 = 0, \quad (3.1)$$

где  $C_1 = \frac{E_q U_c}{X_{d\Sigma}} \cos \delta_0$ ;

$$C_2 = C_1 + \frac{X_d - X'_d}{X_{d\Sigma} X'_{d\Sigma}} U_c^2 \sin^2 \delta_0;$$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_c;$$

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_c;$$

$$T'_d = \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} T_{do} \cdot \omega_0;$$

$$E_q - \text{синхронная ЭДС генератора, } E_q = \sqrt{\left(1 + \frac{Q_0}{U_r} X_d\right)^2 + \left(\frac{P_0}{U_r} X_d\right)^2}, \text{ о.е.};$$

$U_c$  – напряжение системы, о.е.;

$$T_j - \text{постоянная инерции генератора, } T_j = \frac{2,74 \cdot G D^2 \cdot n^2}{S_H} \omega_0, \text{ рад};$$

$T_{do}$  – постоянная времени обмотки возбуждения, с;

$\delta_0$  – угол между  $E_q$  и  $U_c$ , рад;

$X_d$  – синхронное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, о.е.;

$X_c$  – эквивалентное сопротивление системы, о.е.;

$X'_d$  – переходное индуктивное сопротивление генератора, о.е.;

$P_d$  – потери мощности в демпферной обмотке, о.е.

Рассмотрим решение на примере системы, изображенной на рисунке 2.1, состоящей из генератора типа ТВФ-63-2, трансформатора  $T1$  с номинальным напряжением 15,75/121 кВ, трансформатора  $T2$  с номинальным напряжением 121/10,5 кВ, при исходном режиме  $P_0=60$  МВт,  $Q_0=20$  Мвар,  $U_c=10$  кВ.

За базисные условия примем  $U_{бI}=10,5$  кВ,  $U_{бII}=115$  кВ,  $U_{бIII}=10,5$  кВ,  $S_б=78,75$  МВА.

##### 3.1.1. Метод D-разбиения для анализа статической устойчивости электроэнергетической системы

Для определения области допустимых значений сопротивления системы, приведенной на рисунке 2.1 используем метод D-разбиения по неиз-

вестным параметрам  $C_1$  и  $C_2$ . Для этого произведем преобразования характеристического уравнения:

- заменим  $\frac{d^3\delta}{dt^3}$  на  $p^3$ ,  $\frac{d^2\delta}{dt^2}$  на  $p^2$ ,  $\frac{d\delta}{dt}$  на  $p$ ;
- получим новое характеристическое уравнение вида

$$T_j T'_d p^3 + (T_j + P_d T'_d) p^2 + (C_2 T'_d + P_d) p + C_1 = 0; \quad (3.2)$$

- предположим, что имеется пара чисто мнимых корней характеристического уравнения  $\pm j\omega$

$$T_j T'_d (j\omega)^3 + (T_j + P_d T'_d) (j\omega)^2 + (C_2 T'_d + P_d) (j\omega) + C_1 = 0; \quad (3.3)$$

- раскроем скобки и разделим характеристическое уравнение на систему из двух уравнений – действительной и мнимой частями

$$-j \cdot T_j T'_d \omega^3 - (T_j + P_d T'_d) \omega^2 + j \cdot (C_2 T'_d + P_d) \omega + C_1 = 0; \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} U(\omega) = -(T_j + P_d T'_d) \omega^2 + C_1 = 0 \\ V(\omega) = -T_j T'_d \omega^3 + (C_2 T'_d + P_d) \omega = 0 \end{cases}; \quad (3.5)$$

Постоянная инерции генераторного агрегата включает инерцию турбогенератора и инерцию турбины, поэтому постоянная времени инерции турбоагрегата равна

$$T_j = \frac{2,74 \cdot (GD_\Gamma + GD_T)^2 \cdot n^2}{S_H} \omega_0, \quad (3.6)$$

$$T_j = \frac{2,74 \cdot (1,5 \cdot 8,85 + 8,85)^2 \cdot 3000^2}{78,75 \cdot 10^6} 314 = 2169,122 \text{ (рад).}$$

Приведенная постоянная времени обмотки возбуждения

$$T'_d = \frac{0,202}{1,513} \cdot 6,15 \cdot 314 = 257,82 \text{ (рад)}$$

Мощность потерь в демпферных обмотках составляет

$$0,0025 P_H = 0,0025 \cdot 0,85 = 0,002 \text{ (о.е.)}$$

где  $P_H = 0,8$  о.е.

Постоянная  $C_1$

$$C_1 = \frac{1,801 \cdot 0,95}{1,513 + X_c} \cos(\arcsin 0,445 X_c) = \frac{1,711}{1,513 + X_c} \sqrt{1 - 0,198 X_c^2}, \quad (3.7)$$

где  $U_T=1$  о.е.;

$$U_C=0,95 \text{ о.е.};$$

$$X_{d\Sigma} = 1,513 + X_c;$$

$$P_0=0,761 \text{ о.е.};$$

$$Q_0=0,254 \text{ о.е.};$$

$$E_q = \sqrt{\left(1 + \frac{0,254}{1} 1,513\right)^2 + \left(\frac{0,761}{1} 1,513\right)^2} = 1,801 \text{ о.е.};$$

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_0}{P_m} = \arcsin \frac{P_0 \cdot X_c}{E_q \cdot U_C} = \arcsin \frac{0,761 \cdot X_c}{1,801 \cdot 0,95} = \arcsin 0,445 X_c$$

Постоянная  $C_2$

$$C_2 = \frac{1,711}{1,513+X_c} \sqrt{1 - 0,198 X_c^2} + \frac{1,513-0,202}{(1,513+X_c) \cdot (0,202+X_c)} 0,95^2 \sin^2(\arcsin 0,445 X_c) = \frac{1,711}{1,513+X_c} \sqrt{1 - 0,198 X_c^2} + \frac{0,263 X_c^2}{(1,513+X_c) \cdot (0,202+X_c)}, \quad (3.8)$$

где  $X'_{d\Sigma} = 0,202 + X_c$ .

Подставим рассчитанные величины в (3.5) и упростим

$$\begin{cases} U(\omega) = -(2169,122 + 0,002 \cdot 257,82)\omega^2 + C_1 = 0 \\ V(\omega) = -2169,122 \cdot 257,82\omega^3 + (C_2 \cdot 257,82 + 0,002)\omega = 0 \end{cases}; \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} U(\omega) = -2169,638\omega^2 + C_1 = 0 \\ V(\omega) = -559243,034\omega^3 + 0,002 \cdot \omega + C_2 \cdot 257,82 \cdot \omega = 0 \end{cases}; \quad (3.10)$$

где  $C_1=f(X_c)$  и  $C_2=f(X_c)$ .

Произведем D-разбиение по параметрам  $C_1$  и  $C_2$  для этого приведем систему (3.10) к виду

$$\begin{cases} 1 \cdot C_1 + 0 \cdot C_2 = 2169,638\omega^2 \\ 0 \cdot C_1 + 257,82 \cdot \omega \cdot C_2 = 559243,034\omega^3 - 0,002 \cdot \omega \end{cases}; \quad (3.11)$$

Найдем определители системы

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 257,82 \cdot \omega \end{vmatrix} = 257,82 \cdot \omega; \quad (3.12)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 2169,638\omega^2 & 0 \\ 559243,034\omega^3 - 0,002 \cdot \omega & 257,82 \cdot \omega \end{vmatrix} = 559376,069 \cdot \omega^3; \quad (3.13)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 2169,638\omega^2 \\ 0 & 559243,034\omega^3 - 0,002 \cdot \omega \end{vmatrix} = 559243,034\omega^3 - 0,002 \cdot \omega. \quad (3.14)$$

Выразим параметры  $C_1$  и  $C_2$

$$C_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{559376,069 \cdot \omega^3}{257,82 \cdot \omega} = 2169,638 \cdot \omega^2; \quad (3.15)$$

$$C_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{559243,034\omega^3 - 0,002 \cdot \omega}{257,82 \cdot \omega} = 2169,638 \cdot \omega^2 - 7,8 \cdot 10^{-9}. \quad (3.16)$$

Определим область значений параметров, при которых система будет устойчивой. Для этого на плоскости параметров  $C_1$  и  $C_2$  построим характеристику D-разбиения, выберем точку в любой из полученных областей и подставим значения параметров в характеристическое уравнение (3.2). Затем определим устойчивость системы с помощью любого известного критерия.

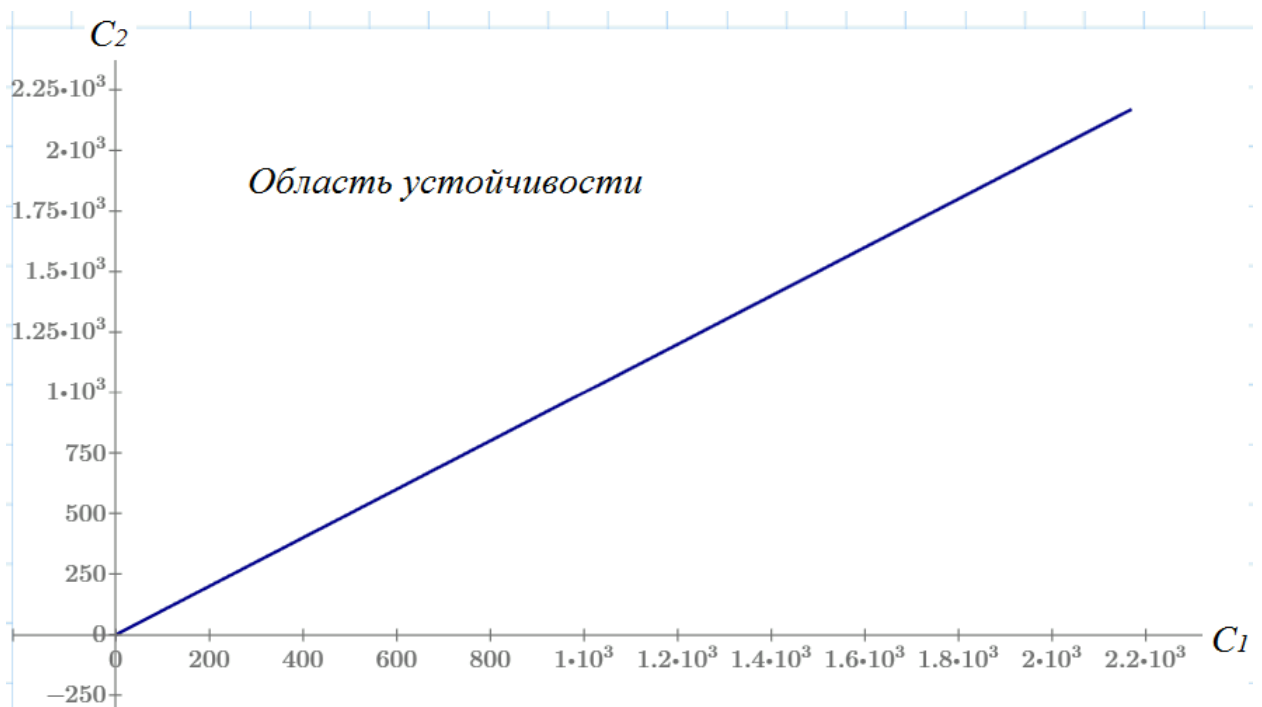


Рис. 3.1. Характеристика D-разбиения по параметрам  $C_1$  и  $C_2$

Рассмотрим определение области устойчивости на примере точки (100, 1000). Подставим значение параметров в характеристическое уравнение (3.2)

$$559243,034p^3 + 2169,638p^2 + (1000 \cdot 257,82 + 0,002)p + 100 = 0; \quad (3.17)$$

$$559243,034p^3 + 2169,638p^2 + 257820,002p + 100 = 0; \quad (3.18)$$

Так как степень характеристического уравнения 3, то наиболее простой способ определения устойчивости – критерий Гурвица. Составим матрицу Гурвица

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 2169,638 & 100 & 0 \\ 559243,034 & 257820,002 & 0 \\ 0 & 2169,638 & 100 \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

Все коэффициенты с индексом  $i < 0$  или  $i > n$  обозначаются нулями.

Для соблюдения устойчивости требуется, чтоб все  $n$  диагональных миноров матрицы Гурвица были положительны.

$$\Delta_1 = 2169,638 > 0; \quad (3.21)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 2169,638 & 100 \\ 559243,034 & 257820,002 \end{vmatrix} = 5,035 \cdot 10^8 > 0; \quad (3.22)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 2169,638 & 100 & 0 \\ 559243,034 & 257820,002 & 0 \\ 0 & 2169,638 & 100 \end{vmatrix} = 5,035 \cdot 10^{10} > 0. \quad (3.23)$$

Следовательно, система устойчива в выбранной точке, а значит, устойчива во всей области параметров над характеристикой D-разбиения.

### 3.1.2. Выбор элементов электроэнергетической системы при условии статической устойчивости

Подберем параметры электроэнергетической системы, схема замещения которой изображена на рисунке 3.2, при которой система будет статически устойчива.

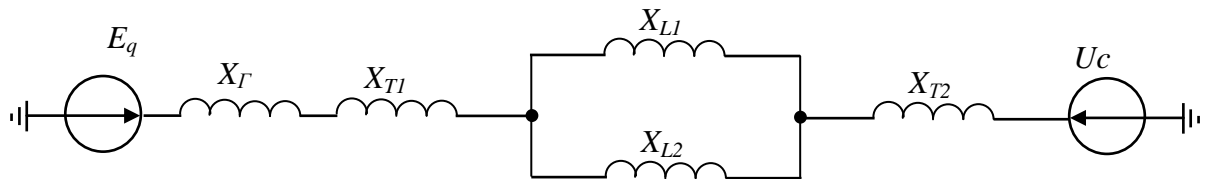


Рис. 3.2. Схема замещения электроэнергетической системы

Задача заключается в выборе величины  $X_C$ , состоящей из суммы сопротивлений элементов системы. Так как мощность рассматриваемого генератора выше 60 МВт, то для регулирования возбуждением генератора используется АРВ-С, следовательно, для определения статической устойчивости  $X_G=0$ . Тогда,

$$X_C = X_{T1} + X_{L1} // X_{L2} + X_{T2}, \quad (3.24)$$

где  $X_{T1}$  - сопротивление трансформатора  $T1$ , о.е.;



$X_{L1}, X_{L2}$  - сопротивление линий  $W1, W2$ , о.е.;  
 $X_{T2}$  - сопротивление трансформатора  $T2$ , о.е.

Сопротивление трансформаторов определим по формуле

$$X_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (3.25)$$

где  $u_k$  - напряжение короткого замыкания трансформатора, %;  
 $U_H$  - номинальное высшее напряжение трансформатора, кВ;  
 $U_6$  - базисное напряжение, кВ;  
 $S_H$  - номинальная мощность трансформатора, МВА;  
 $S_6$  - базисная мощность, МВА.

Так как полная мощность генератора составляет 78,75 МВА, то выбираем мощность трансформатора  $T1$  ближайшей из стандартного ряда, то есть 80 МВА. Полная мощность исходного режима составляет 63 МВА, следовательно, номинальная мощность трансформатора  $T2$  из стандартного ряда – 63 МВА. Тогда сопротивление силовых трансформаторов  $T1$  и  $T2$  соответственно равны

$$X_{T1} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{80} \cdot \frac{78,75}{115^2} = 0,114 \text{ (о.е.)}$$

$$X_{T2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{63} \cdot \frac{78,75}{115^2} = 0,145 \text{ (о.е.)}$$

Выберем тип линии одноцепную с заземленными тросами из хорошо-проводящих материалов длиной 100 км, а ее погонное сопротивление 0,4 Ом/км. Сопротивление линии

$$X_{L1} = X_{L2}; \quad (3.26)$$

$$X_{L1} // X_{L2} = \frac{X_{L1}}{2} = \frac{X_{\text{пг}} \cdot l}{2} \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (3.27)$$

где  $X_{\text{пг}}$  - погонное сопротивление линии, Ом/км;  
 $l$  - длина линии, км;  
 $S_6$  - базисная мощность, МВА.  
 $U_6$  - базисное напряжение, кВ;

$$X_{L1} // X_{L2} = \frac{0,4 \cdot 100}{2} \cdot \frac{78,75}{115^2} = 0,119 \text{ (о.е.)}$$

Сопротивление системы определим по формуле (3.24)

$$X_C = 0,114 + 0,119 + 0,145 = 0,378 \text{ (о.е.)}$$

Проверим, будет ли устойчива электроэнергетическая система при выбранных элементах. Для этого рассчитаем параметры  $C_1$  и  $C_2$  по формулам (3.7) и (3.8).

$$C_1 = \frac{1,711}{1,513+0,378} \sqrt{1 - 0,198 \cdot 0,378^2} = 0,87;$$

$$C_2 = 0,87 + \frac{0,263 \cdot 0,378^2}{(1,513+0,378) \cdot (0,202+0,378)} = 0,905.$$

Полученные значения параметров входят в область устойчивости, следовательно, система статически устойчива с выбранными элементами.

### 3.1.3. Расчет запаса статической устойчивости и построение угловой характеристики мощности генератора

Построим угловую характеристику генератора и рассчитаем запас статической устойчивости по активной мощности. Запас статической устойчивости по активной мощности рассчитывается по формуле

$$K_P = \frac{P_m - P_0}{P_0} 100\%, \quad (3.28)$$

где  $P_m = \frac{U_\Gamma U_c}{X_{d\Sigma}} S_6$  – предельная мощность генератора с АРВ-С, МВА;  
 $X_{d\Sigma} = X_c$  для генераторов с АРВ-С.

Для генератора ТВФ-63-2 предельная мощность равна

$$P_m = \frac{1 \cdot 0,95}{0,378} 78,75 = 198 \text{ (МВт)}$$

Запас статической устойчивости равен

$$K_P = \frac{198 - 60}{60} 100\% = 230\%$$

Уравнение угловой характеристики мощности неявнополюсного генератора определяется по формуле

$$P = P_m \sin \delta, \quad (3.29)$$

$$P = 198 \cdot \sin \delta \text{ (МВт)}$$

На рисунке 3.3 показана угловая характеристика мощности генератора ТВВ-220-2 и исходный режим работы системы.

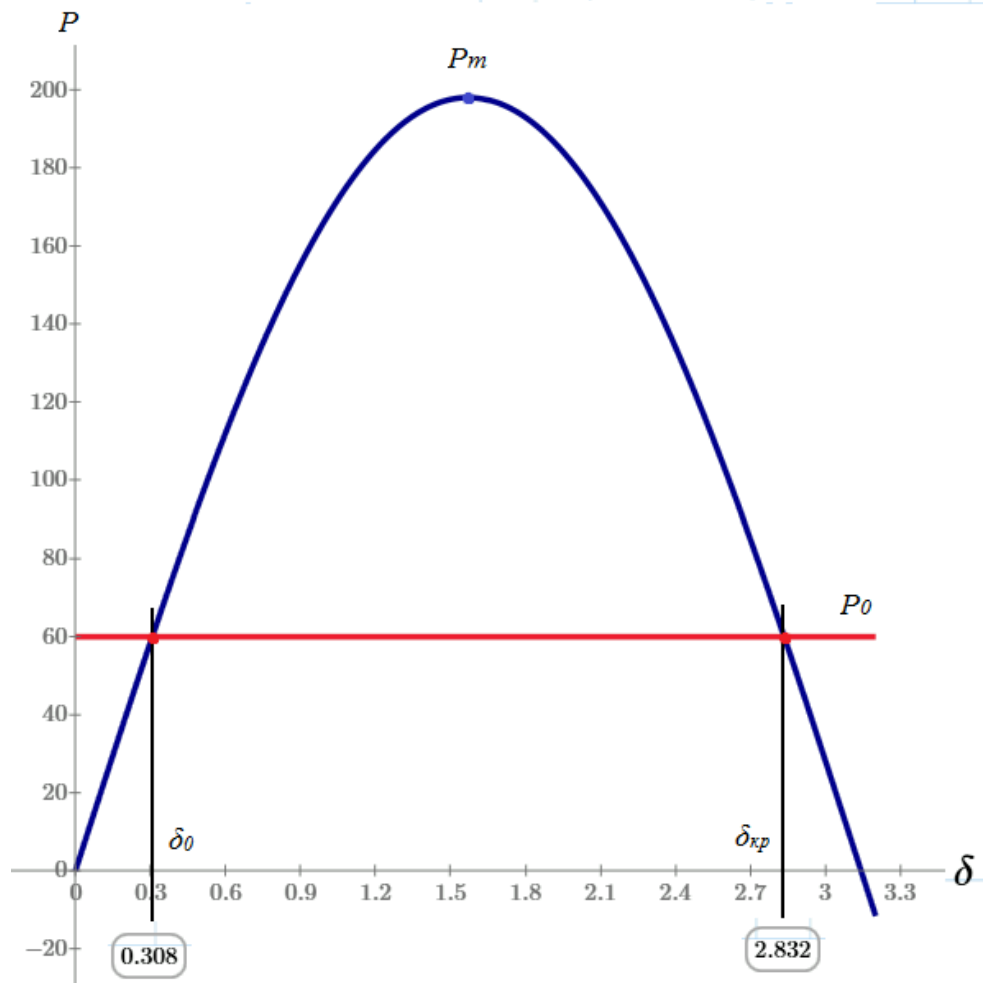


Рис. 3.3. Угловая характеристика мощности генератора ТВФ-63-2

## 3.2. Анализ динамической устойчивости электроэнергетической системы

### 3.2.1. Анализ динамической устойчивости электроэнергетической системы методом площадей

Для анализа динамической устойчивости системы методом площадей необходимо определить изменения угловой характеристики мощности генератора при нарушении нормального режима. Определим сопротивление  $X_{d\Sigma}$  при указанных видах коротких замыканий и отключении поврежденного участка.

Угловая характеристика генератора для анализа динамической характеристики описывается уравнением

$$P = \frac{E'_q U_c}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta, \quad (3.30)$$

где  $E'_q$  – переходная ЭДС генератора, кВ;

$X'_{d\Sigma}$  – переходное сопротивление генератора, Ом;

$$E'_q = \sqrt{\left(1 + \frac{Q_0}{U_r} X'_d\right)^2 + \left(\frac{P_0}{U_r} X'_d\right)^2}; \quad (3.31)$$

$$E_q = \sqrt{\left(1 + \frac{0,254}{1} 0,202\right)^2 + \left(\frac{0,761}{1} 0,202\right)^2} = 1,062 \text{ (о.е.)}.$$

На рисунке 3.4 представлены схемы замещения для нормального, аварийного и послеаварийного режимов работы электроэнергетической системы.

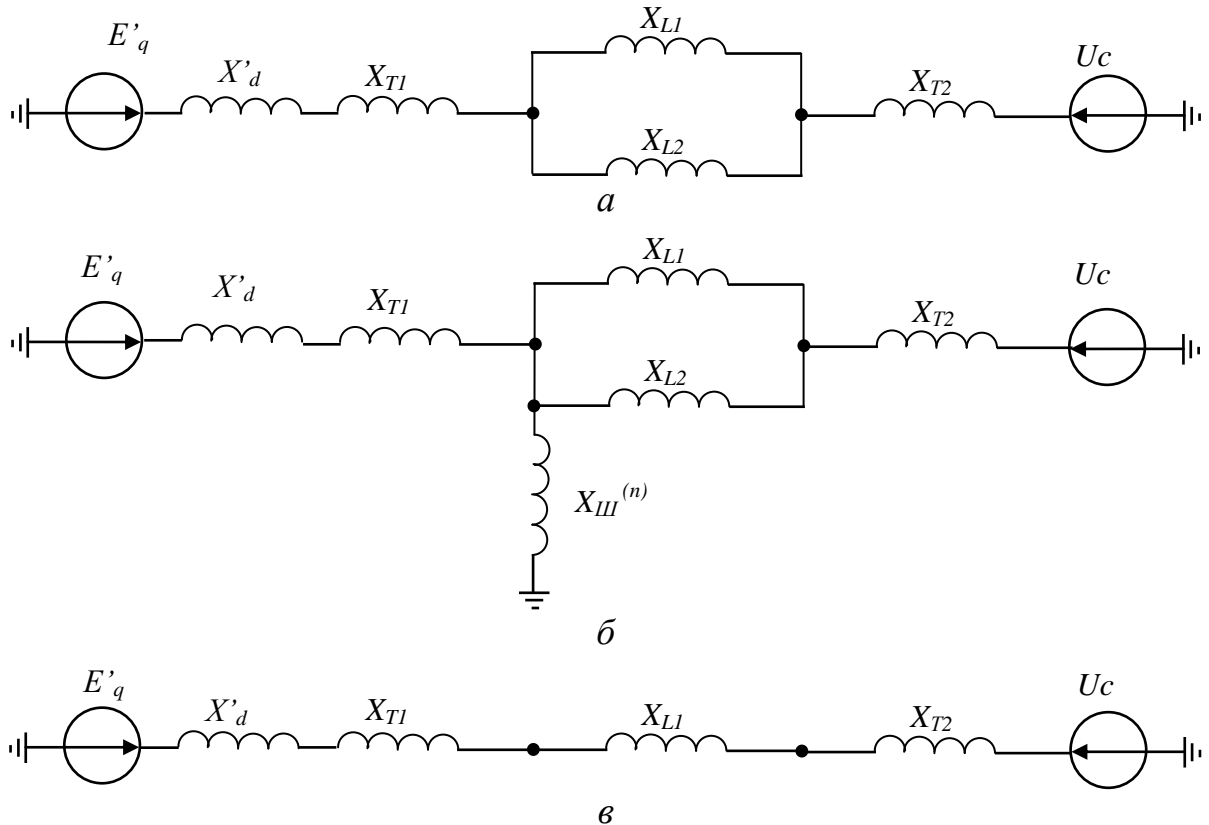


Рис.3.4. Схемы замещения: *а* - нормального режима; *б* - аварийного режима; *в* - послеаварийного режима

Из рисунка следует, что сопротивление системы в нормальном режиме

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_{T1} + X_{L1} // X_{L2} + X_{T2}; \quad (3.32)$$

$$X'_{d\Sigma} = 0,202 + 0,114 + 0,119 + 0,145 = 0,58 \text{ (о.е.)}.$$

Тогда, угловая характеристика генератора в нормальном режиме для определения динамической устойчивости равна

$$P_m = \frac{1,062 \cdot 0,95}{0,58} 78,75 = 137 \text{ (МВт)};$$

$$P = 137 \cdot \sin \delta \text{ (МВт)}.$$

Сопrotивление системы в аварийном режиме определяется по формуле

$$X'_{d\Sigma}(n) = X'_d + X_{T1} + X_{L1} // X_{L2} + X_{T2} + \frac{(X'_d + X_{T1}) \cdot (X_{L1} // X_{L2} + X_{T2})}{X_{\text{Ш}}^{(n)}}, \quad (3.33)$$

где  $X_{\text{Ш}}^{(n)}$  - шунт короткого замыкания вида  $n$ , о.е.

Таблица 3.1

Шунт короткого замыкания

Вид короткого замыкания, $K^{(n)}$	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$
Шунт, $X_{\text{Ш}}^{(n)}$	0	$X_{2\Sigma}$	$X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$	$X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma}$

Сопrotивление элементов обратной последовательности практически равно сопротивлению прямой последовательности, так как в системе не учитываются элементы с несколькими магнитными системами. Токи нулевой последовательности циркулируют между точкой несимметричного короткого замыкания через линии электропередач к трансформаторам системы. То есть

$$X_{2\Sigma} = \frac{(X'_d + X_{T1}) \cdot (X_{L1} // X_{L2} + X_{T2})}{X'_d + X_{T1} + X_{L1} // X_{L2} + X_{T2}} = \frac{(0,202 + 0,114) \cdot (0,119 + 0,145)}{0,202 + 0,114 + 0,119 + 0,145} = 0,143 \text{ (о.е.)};$$

$$X_{0\Sigma} = \frac{(X'_d + X_{T1}) \cdot (X_{L10} // X_{L20} + X_{T2})}{X'_d + X_{T1} + X_{L10} // X_{L20} + X_{T2}} = \frac{(0,202 + 0,114) \cdot (0,119 \cdot 2 + 0,145)}{0,202 + 0,114 + 0,119 \cdot 2 + 0,145} = 0,174 \text{ (о.е.)}.$$

При внезапном однофазном металлическом коротком замыкании  $K^{(1)}$

$$X'_{d\Sigma}(1) = 0,202 + 0,114 + 0,119 + 0,145 + \frac{(0,202 + 0,114) \cdot (0,119 + 0,145)}{0,143 + 0,174} = 0,843 \text{ (о.е.)};$$

$$P_m = \frac{1,062 \cdot 0,95}{0,632} 78,75 = 95 \text{ (МВт)};$$

$$P = 95 \cdot \sin \delta \text{ (МВт)}.$$

При двухфазном коротком замыкании на землю  $K^{(1,1)}$

$$X'_{d\Sigma}(1,1) = 0,202 + 0,114 + 0,119 + 0,145 + \frac{(0,202 + 0,114) \cdot (0,119 + 0,145)}{0,143 // 0,174} = 1,643 \text{ (о.е.)};$$

$$P_m = \frac{1,062 \cdot 0,95}{1,643} 78,75 = 49 \text{ (МВт)};$$

$$P = 49 \cdot \sin \delta \text{ (МВт)}.$$

При трехфазном коротком замыкании  $K^{(3)}$

$$X'_{d\Sigma}(3) = \infty \text{ (о.е.)}.$$

$$P_m = \frac{1,062 \cdot 0,95}{\infty} 78,75 = 0 \text{ (МВт)};$$

$$P = 0 \text{ (МВт)}.$$

При отключении поврежденной линии

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_{T1} + X_{L1} + X_{T2} = 0,202 + 0,114 + 0,238 + 0,145 = 0,699 \text{ (о.е.);}$$

$$P_m = \frac{1,062 \cdot 0,95}{0,699} 78,75 = 114 \text{ (МВт)};$$

$$P = 114 \cdot \sin \delta \text{ (МВт)}.$$

На рисунке 3.5 приведены вычисленные угловые характеристики:

- 1 – нормальный режим;
- 2 – однофазное короткое замыкание на линии;
- 3 – двухфазное короткое замыкание на землю на линии;
- 4 – трехфазное короткое замыкание на линии;
- 5 – отключение поврежденной линии.

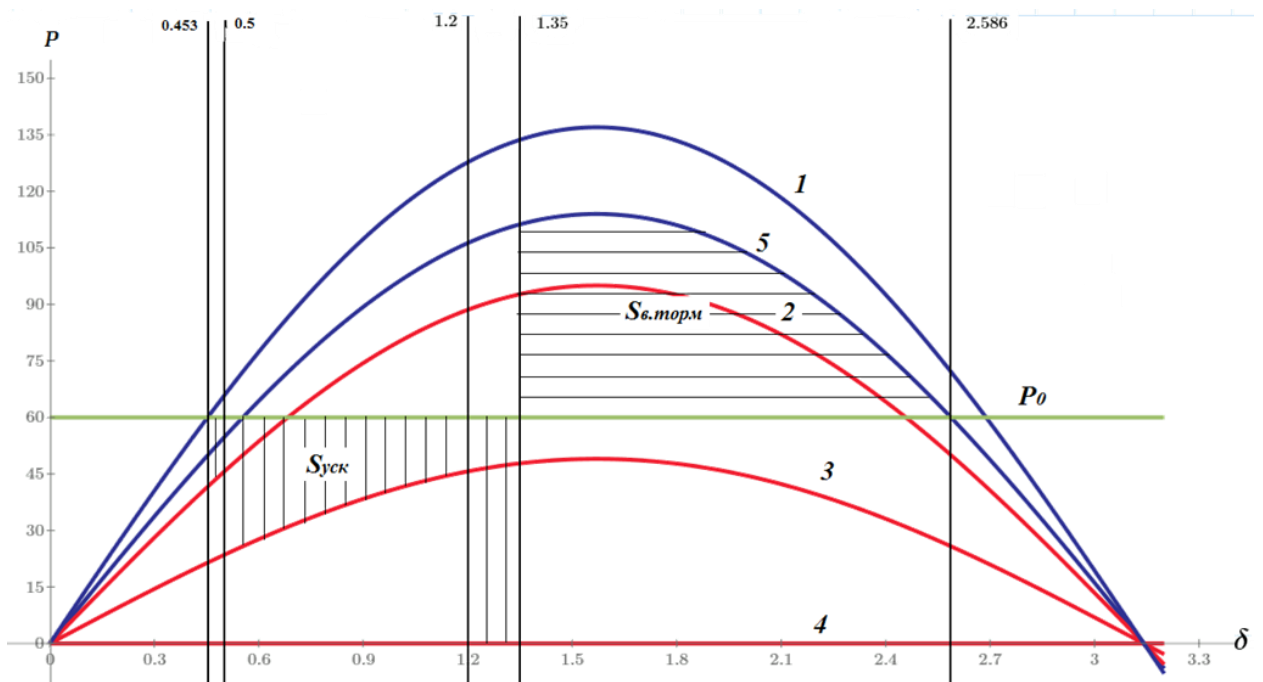


Рис. 3.5. К определению динамической устойчивости методом площадей

Согласно методу площадей, система динамически устойчива, если площадь ускорения меньше площади возможного торможения ротора генератора

$$S_{\text{уск}} \leq S_{\text{в.торм}} \quad (3.34)$$

Определим площади ускорения и возможного торможения ротора генератора:

$$S_{\text{уск}} = \int_{0,453}^{0,5} (60 - 95 \cdot \sin \delta) d\delta + \int_{0,5}^{1,2} (60 - 49 \cdot \sin \delta) d\delta + \int_{1,2}^{1,35} (60 - 0) d\delta = 27;$$

$$S_{\text{в.торм}} = \int_{1,35}^{2,586} (114 \cdot \sin \delta - 60) d\delta = 48;$$

$$27 < 48.$$

Следовательно, система динамически устойчива.

Площадь действительного торможения равна площади ускорения  $S_{\text{уск}} = S_{\text{торм}}$ , из этого условия можно определить конечный угол нагрузки при торможении

$$S_{\text{уск}} = \int_a^b (P_m \cdot \sin \delta - P_0) d\delta; \quad (3.35)$$

$$27 = \int_{1,35}^{\delta_{\text{торм}}} (114 \cdot \sin \delta - 60) d\delta = -114(\cos \delta_{\text{торм}} - \cos 1,35) - 60(\delta_{\text{торм}} - 1,35);$$

$$\delta_{\text{торм}} = 1,853 \text{ (рад)}.$$

При угле нагрузки  $\delta_{\text{торм}} = 1,853$  рад ротор генератора снова начинает ускоряться до значения угла нагрузки  $0,554$  рад. Затем снова замедляется, при этом работа по торможению с учетом потерь должна быть меньше работы по ускорению ротора.

### 3.2.2. Анализ динамической устойчивости электроэнергетической системы методом последовательных интервалов

Для анализа динамической устойчивости системы весь переходный процесс разбивается на небольшие интервалы времени  $\Delta t$ . Для каждого интервала времени последовательно вычисляется приближенное значение приращения  $\Delta \delta$ .

В момент короткого замыкания из-за значительного снижения отдаваемой мощности генератора появляется избыток мощности  $\Delta P$ . На интервале  $\Delta t$  этот избыток мощности постоянный. Тогда приращение скорости генератора  $\Delta v_{(1)}$  и угла  $\Delta \delta_{(1)}$  в течение первого интервала

$$\Delta v_{(1)} = \alpha_{(0)} \cdot \Delta t; \quad (3.36)$$

$$\Delta \delta_{(1)} = \alpha_{(0)} \cdot \frac{\Delta t^2}{2}. \quad (3.37)$$

где  $\alpha_{(0)} = \frac{\Delta P_{(0)}}{T_j}$  – ускорение ротора генератора;

Следовательно, приращение угла в течение первого интервала можно определить по формуле

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{\Delta P_{(0)}}{T_j} \cdot \frac{\Delta t^2}{2}. \quad (3.38)$$

Зададимся начальными значениями  $P_0 = 60$  МВт и  $\delta_0 = 0,453$  рад. Выберем время  $\Delta t = 0,01$  с = 3,14 рад.

Определим изменение угла  $\Delta\delta_{(1)}$  за первый расчетный интервал по формуле (3.38)

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{42}{2169,122} \cdot \frac{0,157^2}{2} = 0,030, \text{ (рад)}$$

где  $\Delta P_0 = P_m^{(1)} \cdot \sin \delta_0$  – избыток мощности, вызванный возникновением однофазного короткого замыкания на землю, МВт.

$$\Delta P_{(1)} = 95 \cdot \sin 0,453 = 42 \text{ (МВт)}.$$

Приращение угла в течение второго и последующих промежутков времени определяется по формуле

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + \frac{\Delta t^2}{T_j} \Delta P_{(n-1)}. \quad (3.39)$$

Найдем значение угла в конце первого интервала времени по формуле

$$\begin{aligned} \delta_{(1)} &= \delta_0 + \Delta\delta_{(1)}. \\ \delta_{(1)} &= 0,453 + 0,030 = 0,483 \text{ (рад)}. \end{aligned} \quad (3.40)$$

Определим избыток мощности во втором интервале времени по формуле

$$\begin{aligned} \Delta P_{(1)} &= P_0 - P_m \sin \delta_{(1)}; \\ \Delta P_{(1)} &= 60 - 95 \sin 0,483 = 16 \text{ (МВт)}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Если в течение некоторого  $i$ -го промежутка времени происходит изменение режима, то избыток мощности изменяется от некоторой величины  $\Delta P_{(i-)}$  до величины  $\Delta P_{(i+)}$ . При вычислении приращения угла в следующем интервале после момента смены режима, значение избытка мощности определяется как среднее из  $\Delta P_{(i-)}$  и  $\Delta P_{(i+)}$ , то есть



$$\Delta\delta_{(i+1)} = \Delta\delta_{(i)} + \frac{\Delta t^2}{T_j} \cdot \frac{\Delta P_{(i-)} + \Delta P_{(i+)}}{2}. \quad (3.42)$$

Так как при угле нагрузки 0,5 рад в рассматриваемом примере однофазное короткое замыкание переходит в двухфазное короткое замыкание на землю и при этом наблюдается изменение режима, то для определения приращения  $\Delta\delta_{(2)}$  воспользуемся формулой (3.42)

$$\Delta\delta_{(2)} = 0,483 + \frac{0,157^2}{2169,122} \cdot \frac{16+36}{2} = 0,523, \quad (3.43)$$

где  $\Delta P_{(i-)} = \Delta P_{(1)} = 16$  (МВт), а  $\Delta P_{(i+)} = 60 - 49 \sin 0,476 = 36$  (МВт).

Остальные расчеты сведем в таблицу

Таблица 3.2

Расчет предельного времени отключения короткого замыкания

Время $t$ , с	Избыток мощности, МВт	Приращение угла нагрузки $\Delta\delta$ , рад	Угол на- грузки $\delta$ , рад	Режим работы
0,01	42	0,030	0,453	Однофазное КЗ
0,02	16	0,041	0,483	Двухфазное КЗ на землю
0,03	36	0,077	0,523	
0,04	32	0,100	0,601	
0,05	28	0,120	0,701	
0,06	24	0,138	0,821	
0,07	20	0,152	0,959	
0,08	16	0,163	1,110	
0,09	13	0,184	1,273	Трехфазное КЗ
0,10	60	0,236	1,457	Отключение КЗ

На рисунке 3.6. изображена зависимость изменения угла нагрузки во времени.

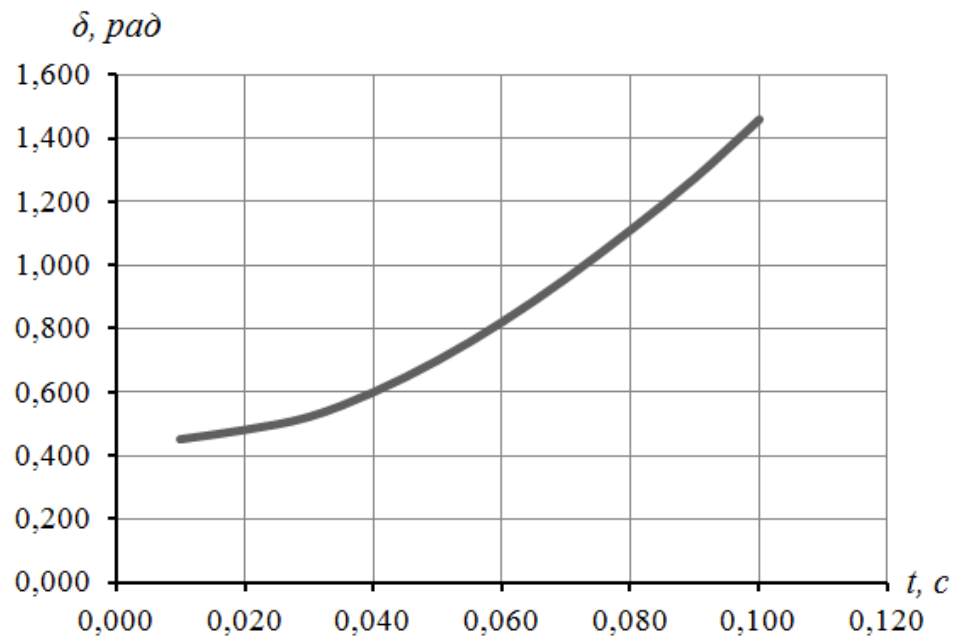


Рис. 3.6. Зависимость  $\delta=f(t)$

Таким образом, время перехода однофазного короткого замыкания в двухфазное на землю - 20 мс, время перехода в трехфазное короткое замыкание - 90 мс, а предельное время отключения короткого замыкания - 100 мс с точностью  $\pm 10$  мс.

#### 4. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЩИТЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Уравнение механического движения ротора генератора. Векторная диаграмма простейшей электрической системы. Выражения для мощностей через различные ЭДС генератора.
2. Определение угловых характеристик мощности через собственные и взаимные сопротивления.
3. Динамическая устойчивость. Причины и характер больших возмущений в электроэнергетической системе. Энергетические соотношения, характеризующие движение ротора генератора.
4. Способы площадей, допущения и область применения. Определение предельного угла отключения короткого замыкания.
5. Численное решение уравнения движения ротора генератора. Метод последовательных интервалов. Влияние демпфирования.
6. Анализ процессов с учетом форсировки возбуждения генератора.
7. Особенности расчета переходных процессов в сложной системе.
8. Математическое описание переходных процессов при анализе статической устойчивости.
9. Метод малых колебаний. Необходимые и достаточные условия статической устойчивости.
10. Статическая устойчивость и малые колебания в нерегулируемой системе.
11. Нарушения устойчивости в виде сползания, самораскачивания и самовозбуждения и способы их подавления.
12. Анализ статической устойчивости простейшей системы с учетом автоматического регулятора возбуждения пропорционального действия и регулятора сильного действия.
13. Переходные процессы в узлах нагрузки системы. Статические и динамические характеристики нагрузки.
14. Уравнение движения асинхронного двигателя.
15. Изменение условий статической устойчивости асинхронного двигателя при его работе от источника соизмеримой мощности.
16. Лавина напряжения – причина возникновения и средства подавления.
17. Практические критерии для узлов комплексных нагрузок.
18. Статические характеристики и регулирующие эффекты мощности нагрузок по напряжению.
19. Поведение нагрузки при больших возмущениях.
20. Численное решение уравнения движения ротора асинхронного двигателя при больших возмущениях.
21. Причины возникновения асинхронного режима.
22. Понятие результирующей устойчивости.

23. Процесс выпадения из синхронизма, необходимое условие ресинхронизации.
24. Практические способы восстановления синхронного режима.
25. Изменения частоты в электроэнергетических системах. Требования к частоте.
26. Виды регулирования первичных двигателей.
27. Статические характеристики нерегулируемых и регулируемых первичных двигателей.
28. Определение динамических характеристик частоты в системе.
29. Лавина частоты и способы ее предотвращения. Автоматическая частотная разгрузка. Мероприятия по обеспечению требуемого уровня частоты в системе.

## **5. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Сроки предоставления контрольной работы на проверку преподавателю предусмотрены графиком самостоятельной работы. После проверки преподаватель допускает студента к защите или студент исправляет ошибки в работе. Если студент по каким-либо причинам не укладывается в график самостоятельной работы, он должен предупредить преподавателя заранее с целью корректирования даты защиты.

Если студент принял решение защищаться с представлением материалов в виде презентации, он должен кроме твёрдой копии представить на кафедру электронный вариант презентации.

Для студентов дистанционной формы обучения оценка выставляется по «пятибалльной» шкале, которая вносится в ведомость и зачетную книжку.

Оценка в «5 баллов» выставляется в том случае, если студент глубоко и прочно освоил суть работы, умеет тесно связывать теорию с практикой - выполнение расчетной части работы в полном объеме; пояснительная записка оформлена аккуратно, содержит все требуемые разделы, выводы даны развернуто, имеются ссылки на литературу, устные ответы содержат защищаемые положения, изложенные исчерпывающе полно, последовательно, четко и логически стройно.

Оценка в «4 балла» выставляется тогда, когда студент освоил суть работы - выполнение расчетной части работы в достаточном объеме; пояснительная записка курсовой работы оформлена аккуратно, содержит все требуемые разделы, имеются выводы, имеются ссылки на литературу, устные ответы содержат защищаемые положения без существенных неточностей.

Оценка в «3 балла» выставляется, если студент имеет знания основного теоретического материала, но не усвоил его деталей - выполнение расчетной части работы в достаточном объеме без существенных неточностей; пояснительная записка оформлена, содержит все требуемые разделы, имеются вы-

воды, устные ответы содержат защищаемые положения без существенных неточностей.

Оценка в «2 балла и ниже» выставляется тогда, когда студент не знает значительную часть или вообще не знает теоретический материал - расчетная часть работы выполнена частично или не выполнена; пояснительная записка оформлена частично или не оформлена, устные ответы не соответствуют защищаемым положениям.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Выполнение контрольной работы по данной дисциплине позволит студентам закрепить знания по расчету и анализу статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем; развитию инженерного мышления; принципам проектирования электроэнергетических и электротехнических систем и отдельных их компонентов; методикам расчета режимов работы электроэнергетических установок различного назначения, определению состава оборудования и его параметров, схемы электроэнергетических объектов; критериям определения и обеспечения эффективных режимов технологического процесса по заданным методикам (ПК-8, ПК-16, ПК-23).

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Переходные процессы в электрических системах [Текст]: учебное пособие для подготовки бакалавров и дипломированных специалистов по направлению "Электроэнергетика" / Ю.А. Куликов; Новосибирский государственный технический университет. - Новосибирск : НГТУ ; М. : Мир: АСТ, 2003. - 284 с.
2. РД 153–34.0–20.527–98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования : руководящие указания / под ред. Б. Н. Неклепаева. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
3. Режимы энергосистем: методы анализа и управления [Текст] : производственно-практическое издание / В. А. Баринов, С. А. Савалов. - М. : Энергоатомиздат, 1990. - 440 с.
4. Переходные процессы в системах электроснабжения [Текст] : учебник для студентов вузов по специальности "Электроснабжение" (по отраслям) / В. Н. Винославский [и др.]. - Киев : Вища школа, 1989. - 422 с. - Библиогр.: с. 418.
5. Электрическая часть электростанций и подстанций [Текст]: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб.пособие для вузов. – 4-е изд, перераб. и доп. / Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

**Задание на контрольную работу**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
 ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
 «ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЕГАЗОВЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 ИНСТИТУТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИНЖИНИРИНГА

**ЗАДАНИЕ**

на контрольную работу

Ф.И.О. обучающегося \_\_\_\_\_

Ф.И.О. руководителя КР Хмара Гузель Азатовна

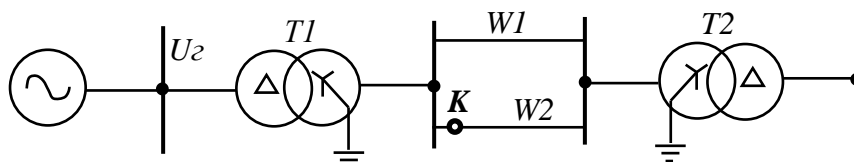
Тема КР «Расчет устойчивости электроэнергетической системы»

Срок предоставления завершенной КР на кафедру «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

**Вариант задания** \_\_\_\_

Исходные данные к КР:

- однолинейная принципиальная схема ЭЭС



- тип генератора  $G$ : \_\_\_\_\_;
- параметры трансформатора  $T1$ : \_\_\_\_\_ кВ;
- параметры трансформатора  $T2$ : \_\_\_\_\_ кВ;
- напряжение системы  $U_c$ : \_\_\_\_\_ кВ;
- исходный режим: \_\_\_\_\_ МВт/Мвар.

**Содержание пояснительной записки**

Наименование раздела (главы)	Количество рисунков	% от объема КР	Дата выполнения
Введение		10	
Расчет статической устойчивости	4	40	
Расчет динамической устойчивости	2	20	
Определение предельного времени отключения короткого замыкания	0	20	
Заключение		10	

Всего рисунков в КР 6

Дата выдачи задания «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. \_\_\_\_\_  
 (подпись руководителя)

Задание принял к исполнению «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. \_\_\_\_\_  
 (подпись студента)

**Титульный лист пояснительной записки**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЕГАЗОВЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ИНСТИТУТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИНЖИНИРИНГА  
Кафедра «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА»

**РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
к контрольной работе  
КР.140400.62.XXX.XXX.2015.00.ПЗ

**РУКОВОДИТЕЛЬ**

доцент, канд. техн. наук  
\_\_\_\_\_ Хмара Г.А.

**РАЗРАБОТЧИК:**

студент группы  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.

Контрольная работа  
защищена с оценкой \_\_\_\_\_

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	5
1.1. Требования к структуре контрольной работы.....	5
1.2. Требования к оформлению контрольной работы.....	6
2. ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ .....	9
2.1. Задание на контрольную работу .....	9
2.2. Указания к расчетам.....	10
3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ .....	12
3.1. Анализ статической устойчивости электроэнергетической системы .....	12
3.1.1. Метод D-разбиения для анализа статической устойчивости электроэнергетической системы .....	12
3.1.2. Выбор элементов электроэнергетической системы при условии статической устойчивости .....	16
3.1.3. Расчет запаса статической устойчивости и построение угловой характеристики мощности генератора .....	18
3.2. Анализ динамической устойчивости электроэнергетической системы .....	19
3.2.1. Анализ динамической устойчивости электроэнергетической системы методом площадей .....	19
3.2.2. Анализ динамической устойчивости электроэнергетической системы методом последовательных интервалов .....	23
4. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЩИТЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	27
5. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ.....	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	29
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	29
Приложение 1 .....	30
Приложение 2 .....	31



Составитель: Хмара Гузель Азатовна

## **РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Методические указания к выполнению контрольной работы  
по дисциплине «Переходные процессы  
в электроэнергетических системах  
с распределенными параметрами»  
для студентов направления  
140400.62 «Электроэнергетика и электротехника»  
профиль «Электроснабжение»  
дистанционной формы обучения

В авторской редакции

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2015. Формат 60x90 1/16. Усл. печ. л. 2,6.

Тираж 50 экз. Заказ № \_\_\_\_.

«Тюменский государственный нефтегазовый университет».  
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.  
Отдел оперативной полиграфии издательства.  
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.