



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
(РИИ АлтГТУ)

Кафедра электроэнергетики

А.Н. ТАТАРНИКОВА

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Задания и методические указания к выполнению курсового проекта
для студентов направления подготовки «Электроэнергетика
и электротехника» всех форм обучения

Рубцовск 2016

УДК 621.31

Татарникова А.Н. Переходные процессы в электроэнергетических системах: Задания и методические указания к выполнению курсового проекта для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт. - Рубцовск, 2016, - 58 с.

В работе даны варианты курсового проекта и указания по оформлению пояснительной записки.

Работа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры электроэнергетики Рубцовского индустриального института.
Протокол № 13 от 22.12.2016 г.

Рецензент: гл. инженер ЗАО «Контакт-108»

И.А. Оборовский

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Общие указания	5
2 Задание к курсовому проекту	5
3 Содержание курсового проекта	10
4 Оформление курсового проекта	11
5. Защита курсового проекта	14
6 Список литературы	14
7 Вопросы к защите курсового проекта «Переходные процессы в ЭЭС»	14
8 Вопросы к экзамену по курсу «Переходные процессы в ЭЭС»	19
9 Теоретическая часть	20
9.1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ	20
9.1.1 Система относительных единиц. Составление и упрощение схем замещения	20
9.1.2 Применение расчетных кривых при определении трехфазного тока короткого замыкания. Расчет основных характеристик переходного процесса	25
9.1.3 Расчет начального сверхпереходного тока трехфазного короткого замыкания аналитическим методом	30
9.1.4 Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Сопротивления различных последовательностей для элементов электрических систем	33
9.1.5 Переходный процесс при однократной поперечной несимметрии	35
9.2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ	41
9.2.1 Основные понятия	41
9.2.2 Причины возникновения переходных процессов	42
9.2.3 Допущения при расчетах устойчивости СЭС	43
9.2.4 Основное уравнение электромеханических переходных процессов	44
9.2.5 Исследование относительного движения ротора с помощью способа площадей	44
9.2.6 Решение уравнения движения ротора генератора методом последовательных интервалов	50
ПРИЛОЖЕНИЕ А	57
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	58

ВВЕДЕНИЕ

Задания и методические указания к выполнению курсового проекта «Расчет переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем» и контрольного задания охватывают основные разделы курса «Переходные процессы в электрических системах».

Целью курсового проекта и контрольного задания является закрепление компетенций у студентов по основным разделам курса, а также более глубокое изучение методов и приемов расчета токов короткого замыкания (как симметричных, так и при нарушении симметрии системы), устойчивости параллельной работы генераторов и нагрузки электрической системы.

В соответствии с выданным вариантом выбирается определенный набор вопросов, сформулированных в заданиях.

Настоящие задания и методические указания предназначены для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

1 ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

В курсовом проекте «Расчет переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем» рассматриваются вопросы электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

Номер задания задается шифром ABCD,

где А — номер варианта в таблице 1;

В — номер варианта в таблице 2;

С — номер варианта в таблице 3 и 4;

Д — номер варианта в таблице 5.

При выполнении задания следует учесть, что пояснительный текст в проекте должен быть кратким, расчёты выполняться с использованием всех формул и последующей подстановкой в них числовых значений. Обязательно указывать размерности величин, если они отличаются от принятых в расчётах относительных единиц.

Необходимо стремиться к наиболее рациональному выбору решения задачи, после каждого этапа решения приводить необходимые пояснения и выводы.

Проекты, выполненные с нарушением перечисленных требований, возвращаются студенту для внесения исправлений.

2 ЗАДАНИЕ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ РАСЧЕТНО - ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

1. На основании схемы электроснабжения (рис. 1, 2) и исходных данных таблиц 1, 2, 3, 4, 5 требуется рассчитать аналитическим путем:

- начальное значение периодической составляющей тока при трехфазном коротком замыкании (КЗ) в заданной точке «К» схемы;

- ударный ток трехфазного КЗ и его действующее значение.

2. Используя метод расчетных кривых, определить величину тока трехфазного КЗ для начального момента времени, через 0,2 с после начала КЗ и в установившемся режиме.

3. Рассчитать аналитически ток несимметричного КЗ в соответствии с вариантом. Построить векторные диаграммы токов и напряжений в точке КЗ.

4. Рассчитать устойчивость эквивалентного генератора электростанции (ЭС) при успешном автоматическом повторном включении (АПВ) поврежденной линии электропередачи (ЛЭП).

5. Определить предельное по сохранению динамической устойчивости время паузы АПВ.

Таблица 2.1 – Необходимые условия

Вариант	Точка КЗ	Вид несимметрии	Вид АПВ	Продолжительность паузы АПВ
1	К1	$K^{(0)}$	ТАПВ	1,0
2	К2	$K^{(1)}$	ТАПВ	1,2
3	К3	$K^{(2)}$	ОАПВ	1,4
4	К4	$K^{(1)}$	ТАПВ	1,6
5	К5	$K^{(0)}$	ОАПВ	1,8

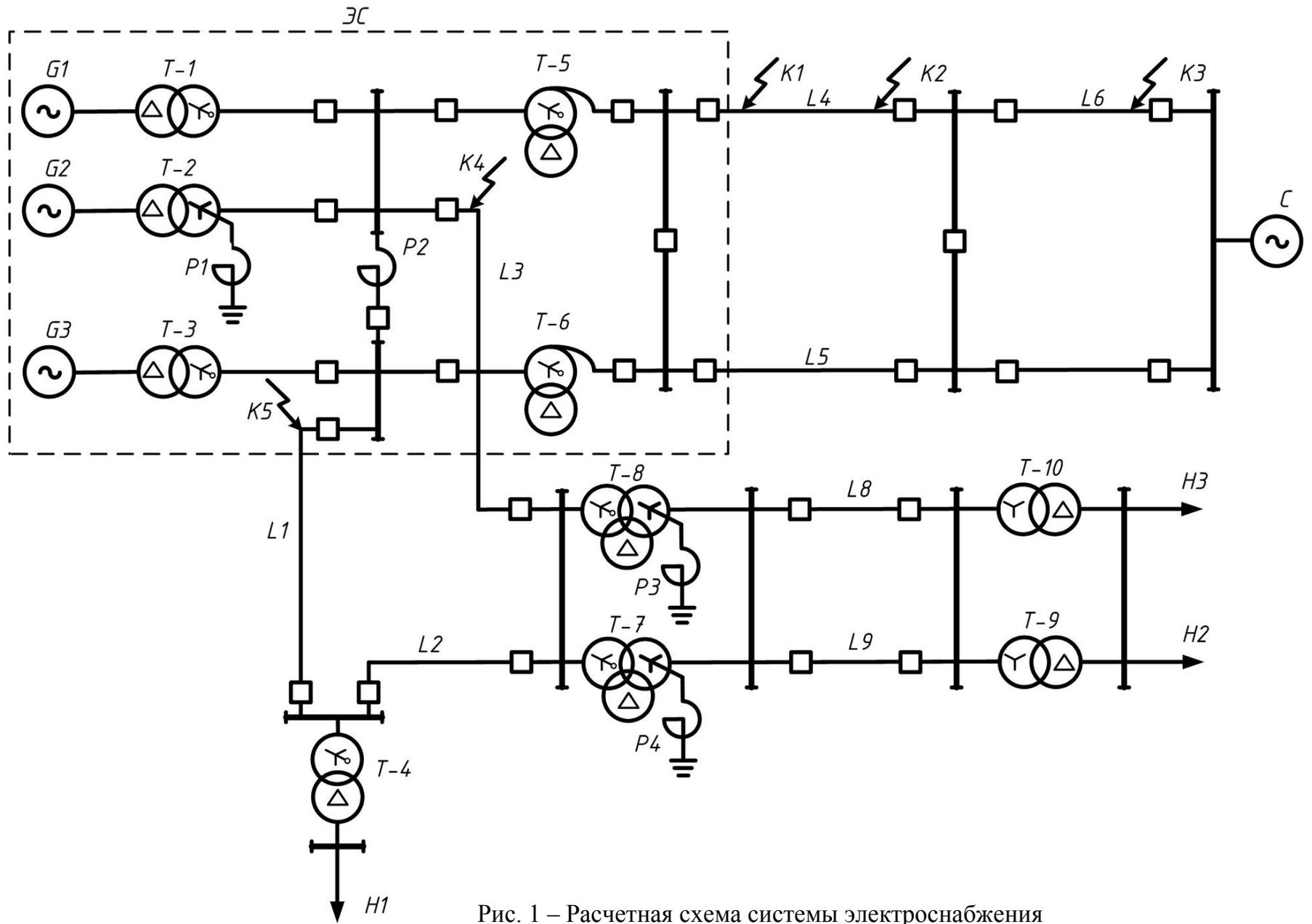


Рис. 1 – Расчетная схема системы электроснабжения

Таблица 2.2 – Параметры генераторов

Номер вар-та	Обозначение по схеме	Тип	$P_{ном},$ МВт	$\cos\varphi$	$U_{ном},$ кВ	Сопротивления, о.е.				
						x''_d	x'_d	x_d	x_2	$T_j,$ сек
1	G1, G2	ТВФ-60-2	60,0	0,80	10,5	0,146	0,217	1,657	0,178	5,8
	G3	ТВФ-120-	120,0	0,80	10,5	0,214	0,314	2,155	0,261	6,5
2	G1, G2	ТВФ-55-	55,0	0,80	10,5	0,123	0,182	1,452	0,150	5,8
	G3	ТВФ-100-	100,0	0,85	10,5	0,183	0,263	1,788	0,223	6,0
3	G1, G2	СВ-	55,0	0,80	10,5	0,200	0,320	0,770	0,300	4,5
	G3	СВ-	70,0	0,80	10,5	0,220	0,340	1,230	0,290	4,8
4	G1, G2	СВ-	56,0	0,85	10,5	0,210	0,210	0,910	0,190	5,0
	G3	ВГС-1525	57,2	0,85	10,5	0,280	0,340	0,660	0,310	5,0
5	G1, G2	ТВФ-60-2	60,0	0,80	10,5	0,146	0,217	1,657	0,178	5,8
	G3	ТВФ-100-	100,0	0,85	10,5	0,183	0,263	1,788	0,223	6,0

Все генераторы снабжены АРВ.

Мощность короткого замыкания на шинах системы «С» $S_{кз} = 1000$ МВА.

Таблица 2.3 – Параметры линий электропередачи

Номер варианта	Длина линий, км					
	L1	L2	L3	L4, L5	L6, L7	L8, L9
1	40	20	40	300	200	50
2	30	30	40	250	500	45
3	45	35	50	350	550	30
4	100	45	80	450	400	50
5	80	55	110	350	450	70

Принять сопротивление линий на единицу длины $x_{уд} = 0,4$ Ом/км.

Таблица 2.4 – Мощности нагрузки

Номер вариант	Мощность нагрузки, кВ·А		
	Н1	Н2	Н3
1	$0,2 \cdot S_{уст}$	$0,3 \cdot S_{уст}$	$0,4 \cdot S_{уст}$
2	$0,3 \cdot S_{уст}$	$0,2 \cdot S_{уст}$	$0,4 \cdot S_{уст}$
3	$0,4 \cdot S_{уст}$	$0,4 \cdot S_{уст}$	$0,2 \cdot S_{уст}$
4	$0,2 \cdot S_{уст}$	$0,2 \cdot S_{уст}$	$0,3 \cdot S_{уст}$
5	$0,5 \cdot S_{уст}$	$0,3 \cdot S_{уст}$	$0,2 \cdot S_{уст}$

$S_{уст}$ – установленная мощность трансформаторов на подстанции, где подключена нагрузка;

$\cos\varphi = 0,85$ – коэффициент мощности нагрузок Н1, Н2, Н3.

Таблица 2.5 – Параметры трансформаторов

Номер вар-та	Обозначение на схеме	Тип (номинальная мощность, МВА)	Напряжение обмоток, U, кВ			Напряжение КЗ, $u_{кз}$, %		
			ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н
1	T1, T2	ТДЦ-80	244,00	—	10,50	—	11	—
	T3	ТДЦ-200	242,00	—	10,50	—	11	—
	T4	ТДЦ-125	242,00	—	10,50	—	11	—
	T5, T6	АОДЦТН-167	$500/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	$11,0/\sqrt{3}$	9,50	29	17,5
	T7, T8	ТДТН-40	230,00	38,50	11,00	12,50	22	9,5
	T9, T10	ТДН-25	38,50	—	6,30	—	8	—
2	T1, T2	ТДЦ-125	242,00	—	10,50	—	11	—
	T3	ТДЦ-200	242,00	—	10,50	—	11	—
	T4	ТДЦ-80	242,00	—	10,50	—	11	—
	T5, T6	АОДЦТН-267	$500/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	$15,75/\sqrt{3}$	8,50	23	12,5
	T7, T8	ТДТН-40	230,00	38,50	6,60	12,50	22	9,5
	T9, T10	ТДН-16	38,50	—	10,50	—	8	—
3	T1, T2	ТДЦ-125	242,00	—	10,50	—	11	—
	T3	ТДЦ-125	242,00	—	10,50	—	11	—
	T4,	ТДЦ-80	242,00	—	6,30	—	11	—
	T5, T6	АОДЦТН-167	$500/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	$15,75/\sqrt{3}$	9,50	29	17,5
	T7, T8	ТДТН-40	230,00	38,50	6,60	12,50	22	9,5
	T9, T10	ТДН-25	38,50	—	10,50	—	8	—
4	T1, T2	ТДЦ-80	242,00	—	10,50	—	11	—
	T3	ТДЦ-125	242,00	—	10,50	—	11	—
	T4,	ТДЦ-80	242,00	—	10,50	—	11	—
	T5, T6	АОДЦТН-167	$500/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	$38,50/\sqrt{3}$	9,50	29	17,5
	T7, T8	ТДТН-25	230,00	38,50	6,60	12,50	22	9,5
	T9, T10	ТДН-6,3	38,50	—	11,00	—	7,5	—
5	T1, T2	ТДЦ-125	242,00	—	10,50	—	11	—
	T3	ТДЦ-80	242,00	—	10,50	—	11	—
	T4,	ТДЦ-125	242,00	—	10,50	—	11	—
	T5, T6	АОДЦТН-267	$500/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	$38,50/\sqrt{3}$	12,50	20	6,5
	T7, T8	ТДТН-40	230,00	38,50	11,00	12,50	22	9,5
	T9, T10	ТДН-16	38,50	—	10,50	—	8	—

Мощность однофазных автотрансформаторов типа АОДЦТН дается в расчете на одну фазу.

Примечания:

Принять усредненные отношения сопротивлений нулевой последовательности к сопротивлению прямой последовательности для воздушных ЛЭП:

- а) напряжением 35-220 кВ со стальным тросом — 3,0;
- б) напряжением 500 кВ — 2,4.

Принять для всех вариантов реакторы:

P1 - ТОРМ – 110 – 650 – 15,

P2 - ТОРМ – 220 – 325 – 12,

P3, P4 - РТМТ – 35 – 200 – 6.

Принять время срабатывания релейной защиты воздушных ЛЭП напряжением 35 кВ – 0,2 с, 110 – 500 кВ – 0,12 с.

3 СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1 Исходные данные.

2 Расчёт аналитическим путем начального значения периодической составляющей тока при трехфазном коротком замыкании в заданной точке «К» схемы, ударного тока и его действующего значения.

2.1 Схема замещения.

2.2 Базисные условия и приведение всех сопротивлений и ЭДС элементов СЭС к базисным условиям.

2.3 Преобразование схемы и определение результирующих ЭДС и сопротивлений.

2.4 Расчёт периодической составляющей, ударного тока и его действующего значения.

3 Определение величины тока трехфазного КЗ для начального момента времени, через 0,2 с после начала КЗ и в установившемся режиме методом расчётных кривых.

3.1 Схема замещения для метода расчётных кривых.

3.2 Преобразование схемы замещения и определение результирующего сопротивления от генератора и от системы.

3.3 Определение расчётных сопротивлений ветвей и относительных значений токов в ветвях для начального момента времени, через 0,2 с после начала КЗ и в установившемся режиме.

3.4 Расчёт периодической составляющей тока при трехфазном КЗ в заданной точке «К» и ударного тока.

4 Расчёт аналитическим методом тока несимметричного КЗ в соответствии с вариантом.

4.1 Схема замещения прямой последовательности и расчёт результирующего сопротивления прямой последовательности.

4.2 Схема замещения обратной последовательности и расчёт результирующего сопротивления обратной последовательности.

4.3 Схема замещения нулевой последовательности и расчёт результирующего сопротивления нулевой последовательности.

4.4 Расчёт симметричных составляющих токов и напряжений несимметричного КЗ.

4.5 Векторные диаграммы токов и напряжений несимметричного КЗ.

5 Расчёт устойчивости эквивалентного генератора электростанции при успешном автоматическом повторном включении поврежденной линии электропередачи.

5.1 Схема замещения и расчёт результирующего сопротивления нормального режима СЭС.

5.2 Схема замещения и расчёт результирующего сопротивления аварийного режима СЭС.

5.3 Схема замещения и расчёт результирующего сопротивления послеаварийного режима СЭС.

5.4 Угловые характеристики мощности генераторов для различных режимов.

5.5 Расчёт методом последовательных интервалов максимального угла отклонения ротора генератора.

6 Определение предельного по сохранению динамической устойчивости времени паузы АПВ при несимметричном КЗ и при полном сбросе мощности.

ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Лист 1 Схемы замещения переходного процесса

Лист 2 График расчета устойчивости генератора

Лист 3 Векторные диаграммы токов и напряжений несимметричного КЗ

4 ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Основной элемент курсового проекта — пояснительная записка (ПЗ), которая должна быть оформлена в соответствии с требованиями ЕСКД, СПДС, ЕСТД и других нормативных документов, а также образовательного стандарта СТО АлтГТУ 12 400 – 2015 «Курсовой проект (курсовая проекта). Общие требования к содержанию, организации выполнения и оформлению» учебного заведения.

Пояснительная записка должна содержать: титульный лист, задание, содержание, введение, основную часть, заключение, список использованных источников.

Титульный лист оформляется на бланке формата А4 и содержит сведения согласно СТО АлтГТУ 12 570 – 2013 (приложение А, форма А4).

На листе документа, следующем за титульным листом, выполняется основная надпись по форме 2 ГОСТ 2.104 или по форме 5 ГОСТ 21.101 (СТО АлтГТУ 12 570 – 2013, приложения В, Г, Д).

На последующих листах оформляется основная надпись по форме 2а или 6 из указанных стандартов (СТО АлтГТУ 12 570 – 2013, приложения В, Г, и Д).

При групповом выполнении курсового проекта на титульном листе указываются все исполнители проекта и разделы, в разработке которых принимал участие каждый исполнитель.

В содержании последовательно перечисляются все заголовки разделов, подразделов и приложений, с указанием номера страницы, на которой они помещены. Слово «Содержание» записывается в виде заголовка симметрично тексту с прописной буквы. Наименования, включенные в содержание, записывают строчными буквами, первая буква – прописная (с абзаца).

Содержание включают в общую нумерацию листов пояснительной записки и размещают после задания.

Задание помещается после титульного листа и включается в общую нумерацию листов пояснительной записки.

Введение должно содержать информацию:

- о сущности и значимости объекта (процесса), к которому относится тема проекта;

- о целях и задачах разработки темы проекта.

Введение должно занимать не более одной страницы, соответствующей машинописному тексту.

Основная часть пояснительной записки должна быть разработана в соответствии с заданием и методическими рекомендациями кафедры.

Основная часть должна составлять не менее 80 % объема пояснительной записки.

Заключение должно содержать краткие выводы, характеризующие результаты проектирования, и отражать проявленные студентом компетенции.

Список использованных источников должен включать все источники, расположенные в порядке ссылок в тексте записки или по алфавиту. Дается библиографическое описание каждого источника в соответствии с ГОСТ 7.1, ГОСТ 7.12.

Текст пояснительной записки оформляется согласно ГОСТ 2.004, ГОСТ 2.105: ГОСТ 2.106 и СТО АлтГТУ 12 570 – 2013).

На листе ПЗ, следующем за титульным листом, выполняется основная надпись формы 1 по ГОСТ 2.104, в соответствии с приложением А.

На последующих листах ПЗ оформляются основные надписи формы 2 приложения А.

Нумерация листов ПЗ должна быть сквозной в пределах всей записки. На титульном листе номер страницы не проставляется. Номера страниц проставляются в основной надписи «Лист». В графе основной надписи «Листов» указывается количество листов ПЗ.

Текст ПЗ оформляют на листах, имеющих рамку: поле слева – 20 мм, справа, сверху и снизу – 5 мм.

При написании текста расстояние от рамки до границ текста: в начале строк – не менее 5 мм; в конце строк - не менее 3 мм; при абзаце – не менее 15 мм.

Расстояние от верхней или нижней строки текста до верхней или нижней рамки листа должно быть не менее 10 мм.

Текст ПЗ должен быть разделен на разделы, подразделы, а в случае необходимости – пункты, подпункты.

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всей ПЗ, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные с абзацным отступом. Подразделы нумеруются в пределах каждого раздела. В номера подразделов входит и номер раздела, отделенный точкой.

Разделы, подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют.

Заголовки следует печатать с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Рекомендуется общий объем графических документов курсового проекта не менее двух листов формата А1 (594x841 мм).

Графические документы могут быть выполнены чертежными карандашами, тушью или с применением графических устройств вывода ЭВМ.

Графические документы должны быть выполнены на листах стандартных форматов с основной надписью в правом нижнем углу по ГОСТ 2.104, ГОСТ 21.101.

При выполнении чертежей, схем, эскизов должны быть соблюдены правила, установленные стандартами ЕСКД, ЕСТД, ЕСПД, СПДС.

Основные требования к чертежам установлены ГОСТ 2.109.

Оформление чертежей, то есть формат, масштаб, линии, чертежные шрифты, должны выбираться согласно ГОСТ 2.301; ГОСТ 2.302; ГОСТ 2.303; ГОСТ 2.304. Изображения, виды, разрезы и сечения выполняются по ГОСТ 2.305.

Графические обозначения материалов на чертежах, нанесение размеров и предельных отклонений, обозначение допусков и посадок необходимо выполнять в соответствии с требованиями ГОСТ 2.306, ГОСТ 2.307, ГОСТ 25346, ГОСТ 25347. Обозначение предельных отклонений, формы и расположения поверхностей должны соответствовать ГОСТ 2.308. Обозначение шероховатости поверхности на рабочих чертежах деталей и эскизах выполняются по ГОСТ 2.309. Нанесение на чертежах (эскизах) обозначений покрытий, термической и других видов обработки – по ГОСТ 2.310. Изображение резьбы на чертежах выполняется по ГОСТ 2.311. Обозначение швов сварных соединений и условные изображения – по ГОСТ 2.312; неразъемные соединения – ГОСТ 2.313. Спецификации выполняются по ГОСТ 2.108, ГОСТ 21.501.

Условия применения указанных стандартов для строительных чертежей регламентируется ГОСТ 21.101.

Обозначение сборочного чертежа и его спецификации должно быть одинаковым. Для различия обозначения чертежа и спецификации сборочному чертежу присваивают шифр «СБ», проставляемый в конце обозначения, а спецификации шифр не присваивается. Сборочному чертежу, совмещенному со спецификацией, шифр не присваивается.

При выборе вида и типа схемы руководствуются ГОСТ 2.701, который определяет общие требования к их выполнению.

Схемы должны выполняться в соответствии с требованиями действующих стандартов: ГОСТ 2.702, ГОСТ 2.703, ГОСТ 2.704, ГОСТ 2.710, ГОСТ 2.721, ГОСТ 2.747.

При выполнении общих архитектурно - строительных чертежей (фасадов, планов и разрезов зданий) следует руководствоваться ГОСТ 21.501, в части требований к рабочим чертежам – ГОСТ 21.101.

Схемы алгоритмов и программ выполняются в соответствии с ГОСТ 19.701.

5 ЗАЩИТА КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Защита курсовых проектов проводится в соответствии с требованиями СТО АлтГТУ 12 400 – 2015 и методическими рекомендациями к курсовому проектированию.

Защита курсового проекта проводится публично при участии руководителя и одного-двух сотрудников.

6 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котова, Е.Н. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебно-методическое пособие / Е.Н. Котова, Т.Ю. Паниковская; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. - Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. - 217 с. : ил., табл., схем. - ISBN 978-5-7996-1254-2; То же [Электронный ресурс]. - URL:<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275810>

2. Переходные процессы в электроэнергетических системах: [текст] Учеб. пособие / Ред. И.П. Крючков. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. - 416 с. (5 экз)

3. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2000.

4. Татарникова А.Н., Парфенова Н.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Часть 2. Электромеханические переходные процессы: Учебное пособие для студентов специальности 130302 «Электроэнергетики и электротехника» всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2016. – 41 с.

5. Татарникова А.Н., Парфенова Н.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Часть 1: Электромагнитные переходные процессы: Учебное пособие для студентов специальности 130302 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2016.- 78 с.

6. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: [текст]: учеб. пособие / В.К. Шабад. – М.: Академия, 2013. - 192 с. (10 экз).

7 ВОПРОСЫ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА «ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЭС»

Часть 1 «Электромагнитные переходные процессы»

1. Назначение и устройство генератора.
2. Какие машины называются синхронными?
3. Какие машины называются асинхронными?
4. Отличие синхронной машины от асинхронной.

5. Что такое «короткое замыкание» и его виды.
6. Причины возникновения КЗ.
7. Последствия КЗ.
8. Назначение расчетов токов КЗ.
9. Симметричные и несимметричные КЗ.
10. Какие допущения приняты в КР при расчетах токов КЗ?
11. Составление расчетной схемы и схемы замещения.
12. Схемы замещения отдельных элементов СЭС.
13. Какие элементы СЭС вводятся в схему замещения ЭДС и сопротивлением?
14. Какие элементы СЭС вводятся в схему замещения сопротивлением?
15. В каких единицах производят расчеты токов КЗ?
16. Назначение системы относительных единиц.
17. Как производится выбор базисных условий?
18. Формулы для расчета базисного тока основной ступени и на других ступенях напряжения.
19. Как привести к базисным условиям сопротивления СЭС, заданные в омах?
20. Как привести к базисным условиям сопротивления СЭС, заданные в относительных единицах?
21. Как привести к базисным условиям сопротивление СЭС, заданное в процентах?
22. Составляющие тока КЗ.
23. Графики изменения полного тока КЗ, периодической и апериодической составляющей от системы.
24. Графики изменения полного тока КЗ, периодической и апериодической составляющей от генератора с АРВ.
25. Графики изменения полного тока КЗ, периодической и апериодической составляющей от генератора без АРВ.
26. Методы расчета симметричных и несимметричных КЗ.
27. Какие токи КЗ рассчитаны в КР и для каких целей они предназначены?
28. Методы расчета периодической составляющей тока КЗ.
29. Какой ток учитывает апериодическую составляющую?
30. Какой ток называется ударным, когда он возникает?
31. От чего зависит длительность протекания ударного тока?
32. Какой коэффициент называется ударным?
33. Какие элементы системы являются источниками питания места КЗ?
34. Когда можно произвести расчет токов КЗ по общему изменению?
35. Когда производится расчет токов КЗ по индивидуальному изменению?
36. Формула для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ и ударного тока аналитическим методом.
37. Формула для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ и ударного тока методом расчетных кривых.

38. В чем заключается метод расчетных кривых?
39. Составление схемы замещения для метода расчетных кривых.
40. Место и время определения тока КЗ методом расчетных кривых.
41. Какое сопротивление называется расчетным, а какое результирующим?
42. Формула для определения расчетного сопротивления.
43. Какие КЗ являются несимметричными?
44. Метод расчета несимметричных токов КЗ.
45. Как составляется схема замещения прямой последовательности?
46. Как составляется схема замещения обратной последовательности?
47. Чем отличаются схемы замещения прямой и нулевой последовательности?
48. Какие сопротивления элементов СЭС прямой и обратной последовательности имеют одинаковые значения?
49. Какие сопротивления элементов СЭС обратной последовательности отличаются от сопротивления прямой и почему?
50. Как составляется схема замещения нулевой последовательности?
51. Какие элементы СЭС входят в схему нулевой последовательности?
52. Граничные условия для однофазного, двухфазного, двухфазного КЗ на землю.
53. Какая фаза называется особой?

Часть 2 «Электромеханические переходные процессы»

1. Что является основной задачей электроэнергетической системы?
2. Как определить предельные угол и время отключения КЗ?
3. Как оценивается динамическая устойчивость СЭС по изменению угла δ во времени?
4. Каковы причины возникновения асинхронных режимов работы синхронных машин?
5. Как влияют параметры электрической сети на критические показатели, характеризующие устойчивость электродвигателей?
6. Как изменится устойчивость узла с асинхронной нагрузкой при компенсации ее реактивной составляющей статическими конденсаторами и синхронными компенсаторами?
7. Что такое лавина напряжения и каковы причины ее возникновения?
8. По каким критериям оценивается статическая устойчивость узла комплексной нагрузки?
9. Каковы мероприятия по повышению устойчивости и надежности системы электроснабжения?
10. Каковы наиболее эффективные методы повышения устойчивости системы электроснабжения с помощью регуляторов электростанций?
11. Как влияет продолжительность КЗ на динамическую устойчивость системы электроснабжения?
12. Влияет ли регулирование напряжения на повышение устойчивости системы электроснабжения?

13. Как влияет реактивная мощность на статическую и динамическую устойчивость системы электроснабжения (СЭС)?
14. Какие мероприятия режимного характера применяются для повышения устойчивости СЭС и какова их эффективность?
15. Какие методы и средства повышения устойчивости предусматриваются при проектировании СЭС?
16. Каковы последствия самовозбуждения электродвигателей?
17. В чем особенность методики исследования переходного процесса в узле нагрузки при резких изменениях режима его работы?
18. Сравните условия устойчивости группы асинхронных двигателей, соизмеримых по мощности с питающей их системой, и устойчивости одиночного двигателя, питающегося от шин неизменного напряжения. Почему в первом случае критическое напряжение оказывается значительно больше, чем во втором?
19. Каковы причины «опрокидывания» асинхронных двигателей нагрузки? Как развивается этот процесс и как он влияет на режим системы?
20. Как могут повлиять отклонения напряжения на устойчивость двигателей нагрузки?
21. Как могут повлиять повышения (понижения) частоты в системе на устойчивость двигателей нагрузки?
22. Особенности электромеханических переходных режимов и их влияние на работу СЭС.
23. Математическое описание статической, динамической и результирующей устойчивости СЭС.
24. Отличительные особенности статической, динамической и результирующей устойчивости СЭС.
25. Оценка статической устойчивости СЭС по практическим критериям и методу малых колебаний.
26. Оценка динамической устойчивости СЭС с двусторонним питанием.
27. Анализ динамической устойчивости СЭС на основе уточненных методов.
28. Влияние АРВ на предел мощности генератора, передаваемой в сеть.
29. Статические характеристики нагрузок и их использование при исследованиях режимов СЭС.
30. Оценка статической устойчивости СЭС с регулированием напряжения трансформаторами.
31. Обобщенные характеристики нагрузки.
32. Влияние толчкообразной нагрузки на режим работы СЭС.
33. Выбор условий пуска синхронных и асинхронных двигателей в узлах нагрузки.
34. Основные направления повышения устойчивости СЭС за счет использования их конструктивных и режимных особенностей.
35. Методы и средства повышения устойчивости при проектировании СЭС.

36. Совмещение расчетов нормального режима работы СЭС и его статической устойчивости.
37. Определения статической, динамической и результирующей устойчивости.
38. Какие режимы работы системы являются расчетными?
39. Для чего выполняется расчет статической устойчивости?
40. Для чего выполняется расчет динамической устойчивости?
41. Какие изменения в системе вызывают малые возмущения?
42. Какие изменения в системе вызывают большие возмущения?
43. Формула и график мощности генератора.
44. Что является границей зон устойчивой и неустойчивой работы?
45. К чему приводит увеличение мощности турбины?
46. Уравнение движения ротора генератора.
47. Назначение демпферных обмоток генератора.
48. Какой момент появляется на валу агрегата при условии $P_T - P_{ЭЛ} < 0$?
49. Какой момент появляется на валу агрегата при условии $P_T - P_{ЭЛ} > 0$?
50. От чего зависит мощность турбины?
51. От чего зависит мощность генератора?
52. Как составляются схемы замещения нормального, аварийного и после-аварийного режимов?
53. Критерий статической устойчивости одномашинной СЭС.
54. Как перемещается рабочая точка режима при малых колебаниях?
55. Формула расчета коэффициента запаса статической и динамической устойчивости одномашинной системы.
56. Критерий динамической устойчивости.
57. Как перемещается рабочая точка режима при больших колебаниях?
58. Чем вызывается увеличение или уменьшение угла δ ?
59. На чем основан метод площадей?
60. Динамическая устойчивость системы при АПВ.
61. Как перемещается рабочая точка режима при АПВ?
62. Как рассчитываются энергия ускорения и торможения в интегральной форме?
63. Какой вид имеет практический критерий динамической устойчивости?
64. Если коэффициент запаса динамической устойчивости $K_3 > 1$, $K_3 = 1$ и $K_3 < 1$, то имеет место критический случай, устойчивый переход, неустойчивый переход?
65. Что такое предельный угол?
66. При каком условии рассчитывается предельный угол отключения K_3 ?
67. При каком условии рассчитывается предельное время отключения K_3 ?
68. Какое сопротивление называется собственным?
69. Какое сопротивление называется взаимным?
70. Когда возникает наиболее тяжелый аварийный режим?

71. При каком КЗ возникает наиболее легкий аварийный режим?
72. Каким методом выполняют качественную оценку переходного процесса?
73. Система сохраняет устойчивость, если угол δ не достигает критического угла, равен $\delta_{кр}$ или больше $\delta_{кр}$?
74. Определение предельного угла отклонения поврежденного участка.
75. Какие элементы системы электроснабжения относятся к основным?
76. Какие элементы системы электроснабжения относятся к дополнительным?
77. Назначение устройств АРВ, АРТ, АЧР, АПВ.
78. Классификация мероприятий по улучшению устойчивости электрических систем.
79. Какие мероприятия для повышения уровня устойчивости основаны на улучшении параметров элементов электрической системы?
80. Какие мероприятия для повышения уровня устойчивости относятся к дополнительным?
81. Какие мероприятия для повышения уровня устойчивости относятся к режимным?
82. Какие задачи решаются при использовании АРВ?
83. Повышение устойчивости системы при использовании АРТ.
84. Повышение устойчивости системы при использовании АЧР.
85. Повышение устойчивости системы при использовании АПВ.
86. Повышение устойчивости системы при использовании устройств релейной защиты и автоматики.

8 ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ ПО КУРСУ «ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЭС»

«Электромеханические переходные процессы»

1. Режимы работы системы.
2. Допущения, принимаемые при анализе устойчивости.
3. Уравнение движения ротора генератора.
4. Схема замещения простейшей СЭС и ее векторная диаграмма.
5. Критерий статической устойчивости одномашиной СЭС.
6. Анализ статической устойчивости одномашиной системы методом малых колебаний.
7. Определение запаса статической и динамической устойчивости одномашиной системы.
8. Энергетический критерий.
9. Критерий динамической устойчивости.
10. Динамическая устойчивость системы при АПВ.
11. Предположение основы способа площадей.
12. Способ площадей и критерий динамической устойчивости системы.
13. Определение предельного угла отклонения поврежденного участка.

14. Определение предельного времени отклонения поврежденного участка.
15. Качественная оценка относительного движения ротора генератора.
16. Классификация мероприятий по улучшению устойчивости электрических систем.
17. Мероприятия, основанные на улучшении параметров элементов электрической системы.
18. Дополнительные устройства для повышения уровня устойчивости.
19. Режимные мероприятия по повышению устойчивости.
20. Повышение устойчивости системы при использовании АРВ.
21. Повышение устойчивости системы при использовании АРТ.
22. Повышение устойчивости системы при использовании АЧР.
23. Повышение устойчивости системы при использовании АПВ.
24. Повышение устойчивости системы при использовании устройств релейной защиты и автоматики.

9 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

9.1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

9.1.1 СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ. СОСТАВЛЕНИЕ И УПРОЩЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Теоретический материал по системе относительных единиц и составлению электрических схем замещения изложен в [1, 2, 4.]. Исходные схемы энергосистем содержат трансформаторные связи. Для упрощения расчетов, проводимых в таких схемах, целесообразно магнитосвязанные цепи (трансформаторные связи) заменять электрически связанными цепями, т.е. переходить к электрическим схемам замещения. Для осуществления такого перехода необходимо сопротивление и ЭДС элементов различных ступеней трансформации заданной схемы привести к какой-либо одной ступени, выбранной в качестве базисной. Следует отметить, что в практических расчетах переходных процессов энергосистем используются упрощенные электрические схемы замещения. При этом пренебрегают ветвями поперечной проводимости схем замещения трансформаторов и линий электропередачи напряжением до 220 кВ включительно и активной составляющей полного сопротивления большинства элементов энергосистемы. Как исключение следует учитывать активное сопротивление протяженных кабельных линий или воздушной линии со стальными проводами.

Параметры элементов электрической схемы замещения могут быть выражены как в именованных, так и в относительных единицах. При наличии нескольких ступеней трансформации расчет схемы замещения удобнее вести в относительных единицах, приведенных к базисным условиям.

Для вычисления электрических величин (тока, сопротивления, напряжения, мощности) в относительных единицах необходимо выбрать базисные величины, единые для всей схемы. Базисные величины могут выбираться произвольно, причем каждая базисная величина служит для

выражения в относительных единицах как соответствующих полных величин мощности (S), сопротивления (Z), тока (I), так и их активных (P , R , I_a) и реактивных (Q , X , I_h) составляющих.

Параметры элементов электрической схемы замещения можно выразить в относительных единицах как по точному приведению, так и по приближенному. При точном приведении рекомендуется применять такую последовательность:

1. обозначить римскими цифрами имеющиеся в схеме ступени трансформации, считая ступень короткого замыкания (КЗ) первой;

2. принять для ступени короткого замыкания базисные мощность U_B , и напряжение. В качестве S_B целесообразно -принять круглое число (100 МВ А, 1000 МВ-А) или часто повторяющуюся в заданной схеме номинальную мощность, в качестве U_{B1} , - номинальное напряжение ступени, где произошло КЗ. Рассчитать значение I_B .

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B} \quad (9.1)$$

3. Пересчитать U_{B1} последовательно на другие ступени трансформации:

$$U_{B2} = U_{B1} \frac{1}{k_{1-2}}, \quad U_{B3} = U_{B2} \frac{1}{k_{2-3}} \quad \text{и т.д.}, \quad (9.2)$$

где k_{1-2}, k_{2-2} - коэффициенты трансформации, определяемые как отношения напряжений на выводах трансформаторов в направлении от ступени, для которой базисное напряжение известно к той ступени, для которой оно рассчитывается. Коэффициенты трансформации определяются по действительным напряжениям на их выводах либо по номинальным напряжениям трансформаторов.

Особо следует обратить внимание на контроль получаемых значений U_{B2} , U_{B3} и т.д., который состоит в том, что при принятых условиях значения U_{B2} , U_{B3} и т.д. не должны отличаться от номинальных напряжений соответствующих ступеней трансформации более, чем на 10 - 15% (табл. 9.1) .

Подсчитать значения базисных токов для тех ступеней трансформации, на которых располагаются токоограничивающие реакторы.

4. По формулам точного приведения, представленным в таблице 9.1, рассчитать значения сопротивлений элементов схемы замещения в относительных единицах.

Обычно у студентов вызывает затруднение вопрос, к какой ступени трансформации отнести двух- или трехобмоточный трансформатор. Двухобмоточный трансформатор целиком, а в трехобмоточном трансформаторе каждая из обмоток может быть отнесена к любой ступени трансформации, с которой соприкасается. Важно только, чтобы в расчетной формуле номинальное напряжение обмотки трансформатора и базисное напряжение соответствовали той ступени трансформации, к которой данная обмотка отнесена.

Таблица 9.1 - Формулы точного приведения элементов СЭС

Элемент схемы	Формула точного приведения	Формула приближенного приведения
Генератор	$X_{*Г\bar{b}} = X''_{*d} \cdot \frac{S_{\bar{b}} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_{\bar{b}}^2}$	$X_{*Г\bar{b}} = X''_{*d} \square \frac{S_{\bar{b}}}{S_{ном}}$
Трансформатор трехфазный двухобмоточный	$X_{*Т\bar{b}} = \frac{u_{к}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_{\bar{b}}^2}$	$X_{*Т\bar{b}} = \frac{u_{к}, \%}{100} \square \frac{S_{\bar{b}}}{S_{ном}}$
Трансформатор трехфазный трехобмоточный (автотрансформатор)	$X_{*ВТ\bar{b}} = \frac{u_{кВ}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_{\bar{b}}^2}$	$X_{*ВТ\bar{b}} = \frac{u_{кВ}, \%}{100} \square \frac{S_{\bar{b}}}{S_{ном}}$
	$X_{*СТ\bar{b}} = \frac{u_{кС}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_{\bar{b}}^2}$	$X_{*СТ\bar{b}} = \frac{u_{кС}, \%}{100} \square \frac{S_{\bar{b}}}{S_{ном}}$
	$X_{*НТ\bar{b}} = \frac{u_{кН}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_{\bar{b}}^2}$	$X_{*НТ\bar{b}} = \frac{u_{кН}, \%}{100} \square \frac{S_{\bar{b}}}{S_{ном}}$
	$\begin{aligned} u_{*ВТ\bar{b}} &= 0,5(u_{кВ-С} + u_{кВ-Н} - u_{кС-Н}) \\ u_{*СТ\bar{b}} &= 0,5(u_{кВ-С} + u_{кС-Н} - u_{кВ-Н}) \\ u_{*НТ\bar{b}} &= 0,5(u_{кВ-Н} + u_{кС-Н} - u_{кВ-С}) \end{aligned}$	$\begin{aligned} u_{*ВТ\bar{b}} &= 0,5(u_{кВ-С} + u_{кВ-Н} - u_{кС-Н}) \\ u_{*СТ\bar{b}} &= 0,5(u_{кВ-С} + u_{кС-Н} - u_{кВ-Н}) \\ u_{*НТ\bar{b}} &= 0,5(u_{кВ-Н} + u_{кС-Н} - u_{кВ-С}) \end{aligned}$
Три однофазных трансформатора или три однофазных автотрансформатора	$X_{*ВТ\bar{b}} = \frac{u_{кВ}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}} \cdot U_{ном}^2}{3 \cdot S_{ном} \cdot U_{\bar{b}}^2}$	$X_{*ВТ\bar{b}} = \frac{u_{кВ}, \%}{100} \square \frac{S_{\bar{b}}}{3 \square S_{ном}}$
	$X_{*СТ\bar{b}} = \frac{u_{кС}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}} \cdot U_{ном}^2}{3 \cdot S_{ном} \cdot U_{\bar{b}}^2}$	$X_{*СТ\bar{b}} = \frac{u_{кС}, \%}{100} \square \frac{S_{\bar{b}}^2}{3 \square S_{ном}}$
	$X_{*НТ\bar{b}} = \frac{u_{кН}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{b}} \cdot U_{ном}^2}{3 \cdot S_{ном} \cdot U_{\bar{b}}^2}$	$X_{*НТ\bar{b}} = \frac{u_{кН}, \%}{100} \square \frac{S_{\bar{b}}}{3 \square S_{ном}}$
Реактор	$X_{*Р\bar{b}} = \frac{X_{ном.Р}, \%}{100} \cdot \frac{I_{\bar{b}N} \cdot U_{ном.Р}}{I_{ном.Р} \cdot U_{\bar{b}N}}$	$X_{*Р\bar{b}} = \frac{X_{ном.Р}, \%}{100} \square \frac{I_{\bar{b}N}}{I_{ном.Р}}$
ЛЭП	$X_{*Л\bar{b}} = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{b}}}{U_{ср.ном}^2}$	$X_{*Л\bar{b}} = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{b}}}{U_{ср.ном}^2}$
Нагрузка	$X_{*нагр.\bar{b}} = X''_{*нагр} \cdot \frac{S_{\bar{b}}}{S_{нагр}}$	$X_{*нагр.\bar{b}} = X''_{*нагр} \cdot \frac{S_{\bar{b}}}{S_{нагр}}$
Система	$X_{*с.\bar{b}} = \frac{S_{\bar{b}}}{S_{КЗ}}$	$X_{*с.\bar{b}} = \frac{S_{\bar{b}}}{S_{КЗ}}$

Формулы приближенного приведения используются тогда, когда нет сведений о действительных коэффициентах трансформации всех или части трансформаторов рассматриваемой схемы или когда допущения расчетного метода приводят к погрешности того же порядка, что и погрешность, обусловленная приближенным приведением параметров схемы замещения. Сущность приближенного приведения элементов к одной ступени трансформации состоит в том, что для каждой ступени трансформации вместо действительных напряжений начала и конца, которые разнятся не более чем на 10%, в расчетах устанавливают среднее номинальное напряжение $U_{ср.ном}$.

Средненоминальное напряжение для каждой ступени трансформации принимают на 5% выше соответствующего номинального напряжения линии электропередачи, что дает следующий ряд $U_{ср}$:

1175; 770; 515; 340; 230; 154; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,4; 0,23; 0,127 кВ.

В расчетах условно принимают, что номинальные напряжения всех элементов (кроме особых случаев для реакторов), находящихся на одной ступени, одинаковы и равны средненоминальному напряжению данной ступени, что позволяет в большинстве расчетных выражений их сократить.

При приближенном приведении параметров схем замещения рекомендуется придерживаться такой последовательности:

- обозначить последовательно римскими цифрами имеющиеся в схеме ступени трансформации, считая ступень КЗ первой;

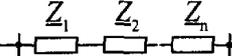
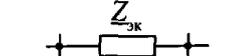
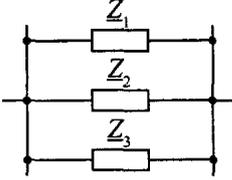
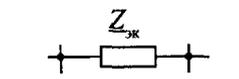
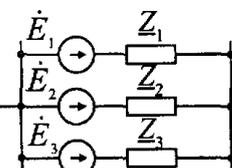
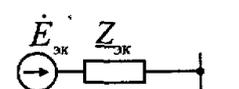
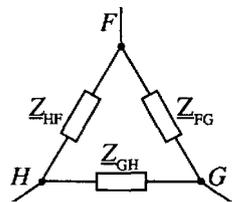
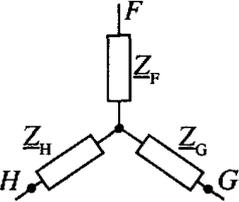
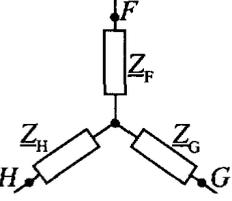
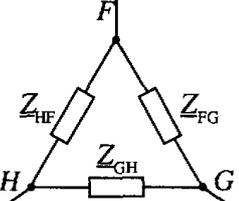
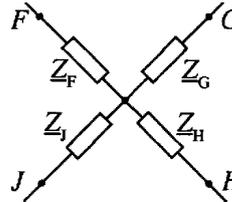
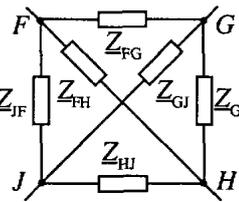
- принять для намеченных ступеней базисные напряжения, равные средненоминальным напряжениям соответствующих ступеней. Рассчитать базисные токи для ступени КЗ и ступеней, содержащих реакторы;

- рассчитать значения сопротивлений элементов схемы замещения по формулам приближенного приведения (см. табл. 9.1). Формулой приближенного приведения для реактора следует пользоваться с некоторой осторожностью, так как реактор одного номинального напряжения может быть установлен на ступени меньшего номинального напряжения. В этом случае для реактора следует применять формулу точного приведения.

При расчете токов короткого замыкания, как правило, возникает необходимость в преобразовании исходной схемы к более простому виду. Приемы упрощения схем замещения изложены в [1, 2]. Применение тех или иных методов преобразования и конечный вид схемы зависят, прежде всего, от конфигурации исходной схемы, применяемого метода расчета и требований, предъявляемых к расчету.

При использовании аналитического метода расчета токов и напряжений переходного процесса исходная схема приводится к эквивалентной ветви с сопротивлением $Z_{рез}$, с одной стороны которой расположена точка КЗ, а с другой - эквивалентная ЭДС всех источников питания $E_{рез}$.

Таблица 9.2 - Основные формулы преобразования схем

Вид преобразования	Схема исходная	Схема эквивалентная	Эквивалентное сопротивление
Последовательное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$
Параллельное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \dots + \frac{1}{\underline{Z}_n}}$ <p>При двух ветвях:</p> $\underline{Z}_{эк} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Замена группы источников эквивалентным			$\dot{E}_{эк} = \frac{\dot{E}_1 \cdot \underline{Y}_1 + \dot{E}_2 \cdot \underline{Y}_2 + \dots + \dot{E}_n \cdot \underline{Y}_n}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n}$ $\underline{Z}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Y}_1} + \frac{1}{\underline{Y}_2} + \dots + \frac{1}{\underline{Y}_n}}$ <p>При двух ветвях:</p> $\dot{E}_{эк} = \frac{\dot{E}_1 \cdot \underline{Z}_2 + \dot{E}_2 \cdot \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Преобразование треугольника в звезду			$\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_{HF} + \underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH}$ $\underline{Z}_F = \frac{\underline{Z}_{FG} \cdot \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_\Sigma}$ $\underline{Z}_G = \frac{\underline{Z}_{FG} \cdot \underline{Z}_{GH}}{\underline{Z}_\Sigma}$ $\underline{Z}_H = \frac{\underline{Z}_{GH} \cdot \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_\Sigma}$
Преобразование трехлучевой звезды в треугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F + \underline{Z}_G + \frac{\underline{Z}_F \cdot \underline{Z}_G}{\underline{Z}_H}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G + \underline{Z}_H + \frac{\underline{Z}_G \cdot \underline{Z}_H}{\underline{Z}_F}$ $\underline{Z}_{HF} = \underline{Z}_F + \underline{Z}_H + \frac{\underline{Z}_F \cdot \underline{Z}_H}{\underline{Z}_G}$
Преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F \cdot \underline{Z}_G \cdot \sum \underline{Y}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G \cdot \underline{Z}_H \cdot \sum \underline{Y}$ <p>.....</p> $\sum \underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}_F} + \frac{1}{\underline{Z}_G} + \frac{1}{\underline{Z}_H} + \frac{1}{\underline{Z}_j}$ <p>Аналогично и при большем числе ветвей</p>

Если расчет токов и напряжений переходного режима основан на методе расчетных кривых, то конечным итогом преобразований схемы замещения должна явиться многолучевая звезда относительно точки КЗ. Здесь рекомендуется придерживаться такой последовательности в упрощениях:

1. наметить в исходной схеме замещения источники питания, которые целесообразно выделить в самостоятельные ветви, основываясь на том, что в такие ветви выделяются разнотипные генераторы (турбо- или гидрогенераторы), иногда и однотипные генераторы, имеющие резко отличительную мощность и электрическую удаленность от точки КЗ, и, наконец, источник неограниченной мощности (система) обязательно выделяется в самостоятельную ветвь. Общее число ветвей не должно быть более трех - пяти;

2. используя приемы последовательного и параллельного сложения сопротивлений, взаимного эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений, многолучевой звезды в многоугольник с диагоналями и расщепления генерирующих узлов в замкнутых контурах, приводят схему к сложнорадиальному виду (без замкнутых контуров) относительно точки КЗ. На этом этапе для последующего упрощения схемы можно использовать коэффициенты распределения токов (C);

3. принять в ветви, соединяющей всю схему с точкой КЗ, коэффициент распределения $C_0 = 1$. Найти значения коэффициентов распределения во всех ветвях схемы. Радиальный вид схемы гарантирует простоту их расчета, используют формулы распределения тока между параллельными ветвями. В качестве контроля расчета необходимо помнить условие: сумма коэффициентов распределения конечных ветвей радиальной схемы должна дать единицу;

4. определить суммарный коэффициент распределения ветвей, относящихся к одному и тому же источнику питания, выделенному в конечной схеме преобразования в самостоятельную ветвь. Результирующее сопротивление всей схемы относительно точки КЗ ($X_{рез}$) и коэффициенты распределения выделенных источников питания ($C_{Гi}$) позволяют рассчитать сопротивление связи указанных источников с местом КЗ;

$$X_{ki} - X_{рс} / C_{Гi} . \quad (9.3)$$

Составление электрической схемы замещения, расчет параметров ее элементов в относительных единицах и, наконец, упрощение схемы замещения являются составными частями большинства задач.

9.1.2 ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА КРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Сущность метода расчетных кривых для анализа переходного процесса при трехфазном коротком замыкании изложена в [1, 2, 4].

Метод расчетных кривых прост и широко используется в практических расчетах. Он основан на применении специальных кривых, которые дают для произвольного момента времени действующее значение периодической составляющей тока КЗ в относительных единицах в месте короткого замыкания

$I_{*пт}$. Эта величина находится по расчетной реактивности ветви $\{X_{*расч}\}$, связывающей источник питания с местом КЗ (рис. 4, 5).

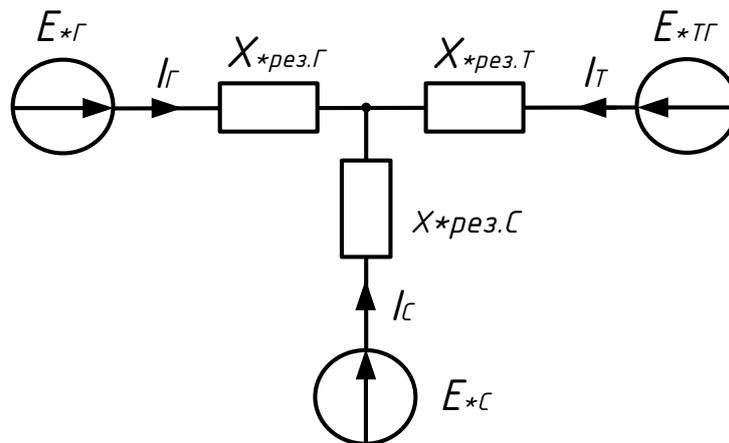


Рис. 3 - Схема замещения для определения токов КЗ методом расчетных кривых

При расчете параметров переходного процесса на основе расчетных кривых применяют такую последовательность:

1) составляют схему замещения, в которую генераторы вводятся сверхпереходными реактивностями, нагрузки отсутствуют, за исключением крупных двигателей и синхронных компенсаторов, расположенных вблизи места короткого замыкания, которые учитываются как генераторы равновеликой мощности;

2) для принятых $S_б$ и U_s определяют параметры элементов эквивалентной электрической схемы замещения;

3) путем последовательных преобразований (см. табл. 9.2) приводят схему замещения к виду многолучевой звезды относительно точки КЗ. Число выделяемых ветвей равно числу источников питания в исходной схеме, влияние которых на результирующий ток в месте КЗ должно быть учтено индивидуально. Основными факторами, определяющими индивидуальность источника питания, являются: тип генератора, наличие системы АРВ, мощность генераторов и их электрическая удаленность от точки КЗ. В процессе преобразования не рекомендуется эквивалентировать генераторы, имеющие резко отличительную индивидуальность. По мере возрастания электрической удаленности от точки КЗ индивидуальность генераторов нивелируется. Источник неограниченной мощности (система) обязательно выделяется в самостоятельную ветвь. Это обусловлено тем, что ток от источников конечной мощности (генераторов) определяется одним методом - методом расчетных кривых, а от системы - другим, то есть аналитическим методом. Чтобы для разных источников одной и той же схемы иметь возможность применять различные расчетные методы, необходимо привести схему к независимому (лучевому) виду относительно указанных источников;

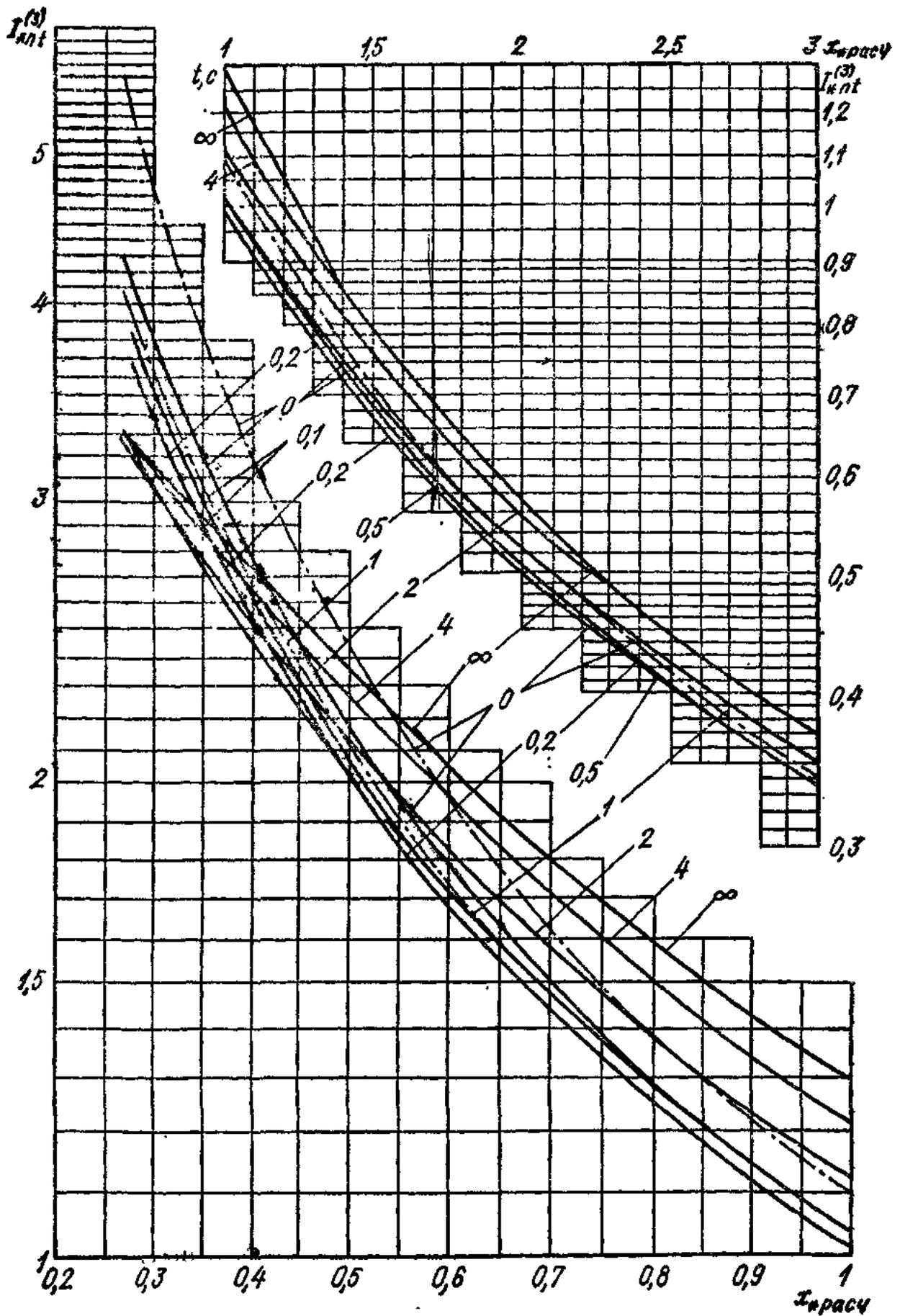


Рис. 4 - Расчетные кривые для типового гидрогенератора с АРВ

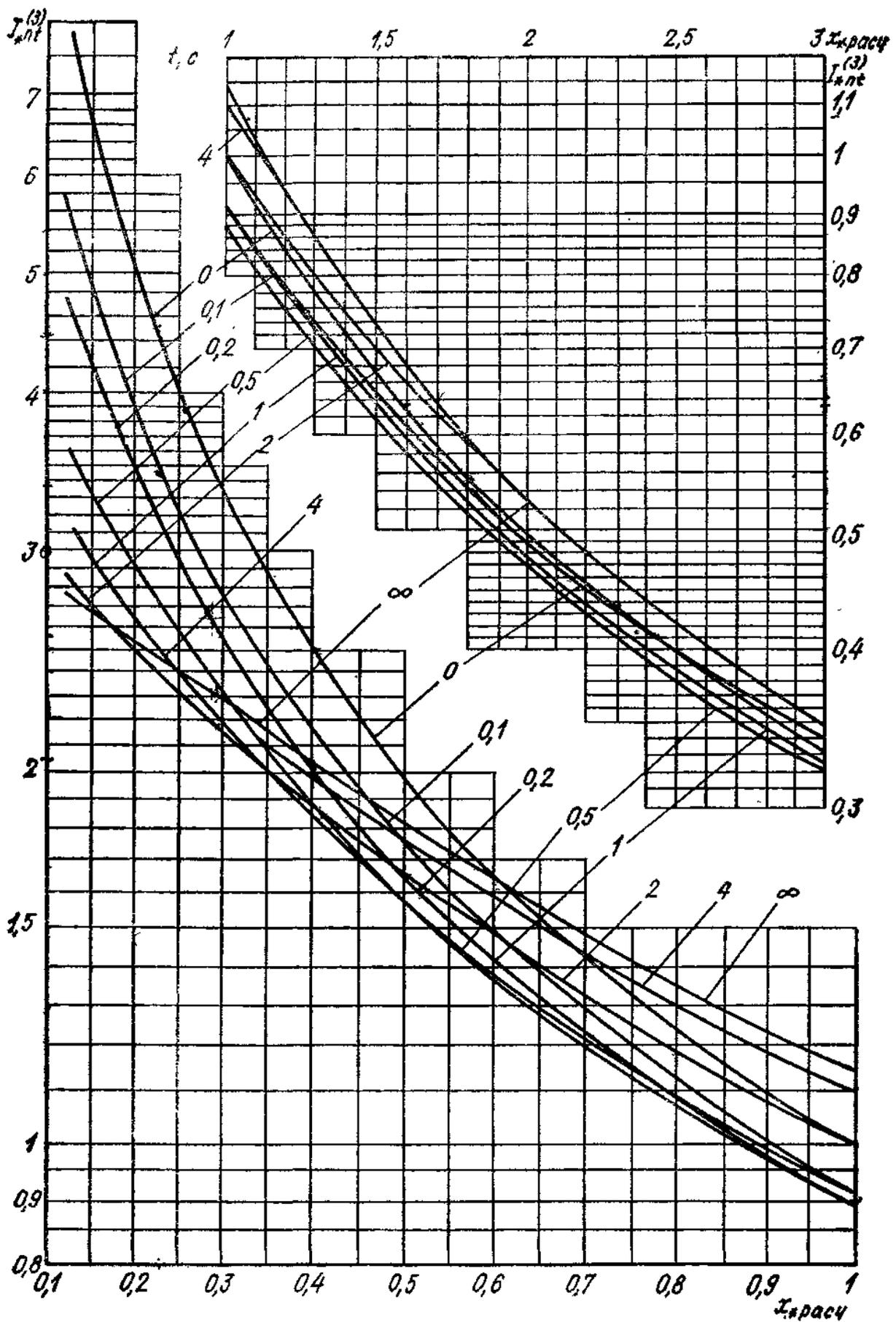


Рис. 5 - Расчетные кривые для типового турбогенератора с АВР

4) для каждой из выделенных ветвей определяют величины расчетных сопротивлений по:

$$X_{*РАСЧ.Г} = X_{*РЕЗ.Г} \frac{S_{НОМ.Г}}{S_{\delta}}; X_{*РАСЧ.Т} = X_{*РЕЗ.Т} \frac{S_{НОМ.Т}}{S_{\delta}}; X_{*РАСЧ.С} = X_{*РЕЗ.С} \frac{S_C}{S_{\delta}},$$

которые представляют сопротивления ветвей, выраженных в относительных единицах, приведенных к суммарной номинальной мощности гидрогенератора $S_{НОМ.Г}$, турбогенератора $S_{НОМ.Т}$ и системы S_C ;

5) по соответствующим расчетным кривым (см. рис. 4, 5) для заданных моментов времени t по $X_{*РАСЧ}$ определяют относительные значения токов в ветвях $I_{*Пт}$.

Если $X_{*РАСЧ} > 3$, то величину $I_{*Пт}$ для любого момента можно считать постоянной и определять аналитическим методом:

$$I_{*Пт} = \frac{I}{X_{*РАСЧ}}; \quad (9.4)$$

б) находят искомую величину периодической составляющей тока короткого замыкания для каждого момента времени в именованных единицах:

$$I_{Пт} = I_{ПтГ} + I_{ПтТ} + I_{ПтС} \text{ или } I_{Пт} = \sum_{i=1}^n I_{*Птi} \cdot I_{НОМ.Эi} + I_{ПтС}, \quad (9.5)$$

где $I_{НОМ.Эi} = \frac{S_{НОМ.Эi}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}}$ - суммарный номинальный ток генераторов ветви i ,

приведенный к напряжению $U_{\delta} = U_{ср}$ той ступени, где рассматривается КЗ;

$$I_{ПтС} = \frac{E_{*С}}{X_{*РАСЧ.С}} I_B = \frac{I_B}{X_{*РАСЧ.С}} - \text{периодическая составляющая тока КЗ от}$$

системы.

Основными характеристиками переходного процесса являются: действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени $I_{Пт}$; I_B - действующее значение полного тока КЗ для момента времени t , $i_{уд}$ - наибольшее действующее значение тока КЗ; - ударный ток КЗ; $S_{Ки}$ - мощность КЗ. Смысл этих характеристик и методика расчета изложены в [1, 2, 4].

В простейшей трехфазной цепи ток переходного процесса состоит из двух слагаемых: вынужденной (периодической) и свободной (апериодической). На практике эти величины рассчитывают для наиболее неблагоприятных условий, когда слагаемые тока переходного процесса достигают максимально возможных значений. Начальное значение апериодической слагаемой достигает максимума, когда до короткого замыкания в схеме был холостой ход, а в момент КЗ периодическая составляющая переходила через свой максимум (положительный или отрицательный). Эти условия заложены в расчетных выражениях, поэтому эти условия называются расчетными.

9.1.3 РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО СВЕРХПЕРЕХОДНОГО ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Теоретический материал по этой теме изложен в [1, 2, 4]. Аналитический метод, как и метод расчетных кривых, позволяет рассчитывать периодическую составляющую тока переходного процесса в системах электроснабжения для любого момента времени. Наиболее просто аналитическим методом находятся токи для $t = 0$ и $t = \infty$. Ограничимся лишь случаем расчета тока КЗ для $t = 0$.

При расчете начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ в электроустановках напряжением свыше 1 кВ в исходную расчетную схему индивидуально должны быть введены все синхронные генераторы и компенсаторы, а также синхронные и асинхронные электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если между электродвигателями и точкой КЗ отсутствуют токоограничивающие реакторы или силовые трансформаторы. В автономных электрических системах следует учитывать и электродвигатели меньшей мощности, если сумма их номинальных токов составляет не менее 1 % от тока в месте КЗ, определенного без учета этих электродвигателей.

Для расчета начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ аналитическим методом по принятой исходной расчетной схеме предварительно следует составить эквивалентную схему замещения, в которой синхронные и асинхронные машины должны быть представлены предварительно приведенными к базисной ступени напряжения или выраженными в относительных единицах при выбранных базисных условиях сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС. Исходные значения сверхпереходных ЭДС следует принимать численно равными их значениям в момент, предшествующий КЗ.

Для синхронных генераторов и электродвигателей сверхпереходную ЭДС в предшествующем режиме следует определять по формуле

$$E'' = \sqrt{(U_{(0)} \pm I_{(0)} \cdot X''_d \cdot \sin \varphi_{(0)})^2 + (I_{(0)} \cdot X''_d \cdot \cos \varphi_{(0)})^2}, \quad (9.6)$$

где $U_{(0)}$, $I_{(0)}$, $\sin \varphi_{(0)}$ – соответственно напряжение на зажимах машины, ток и угол сдвига между векторами напряжения и тока КЗ.

Для синхронных компенсаторов по формуле

$$E'' = U_{(0)} \pm I_{(0)} \cdot X''_d. \quad (9.7)$$

В формулах знак «+» относится к синхронным машинам, которые к моменту КЗ работали в режиме перевозбуждения, а знак «-» - к работавшим с недовозбуждением.

Сверхпереходную ЭДС асинхронных электродвигателей в момент, предшествующий КЗ, следует определять по формуле

$$E'' = \sqrt{(U_{(0)} - I_{(0)} \cdot X''_{AD} \cdot \sin \varphi_{(0)})^2 + (I_{(0)} \cdot X''_{AD} \cdot \cos \varphi_{(0)})^2}, \quad (9.8)$$

где X''_{AD} – сверхпереходное индуктивное сопротивление электродвигателя.

Для обобщенной нагрузки сверхпереходную ЭДС, отнесенную к среднему номинальному напряжению той ступени, на которой эта нагрузка подключена, принимают равной $E''_{н(ном)} = 0,85$, а сверхпереходное сопротивление,

отнесенное к тому же напряжению и суммарной полной мощности (МВ·А) нагрузки, равным $x_{*н(ном)} = 0,35$.

Далее все элементы расчетной схемы приводят к предварительно выбранным базисным условиям (при расчете в относительных единицах) или к одной ступени напряжения (при расчете в именованных единицах). Полученную схему замещения путем соответствующих преобразований приводят к простейшему виду и определяют результирующую ЭДС E .

Если эквивалентная ЭДС $E''_{эке}$ и результирующее сопротивление выражены в именованных единицах, то начальное значение периодической составляющей тока КЗ

$$I'' = I_{п0} = \frac{E''_{эке}}{\sqrt{3} \cdot X_{рез.б}}, \quad (9.9)$$

а если в относительных единицах, то

$$I_{п0} = \frac{E^*_{эке}}{X^*_{рез.б}} \cdot I_б, \quad (9.10)$$

где $I_б$ - базисный ток, соответствующий напряжению той ступени трансформации, на которой произошло КЗ.

Таблица 9.3 - Средние относительные значения X''_{*d} и E''_* при номинальных условиях эксплуатации СЭС

Наименование элемента СЭС	X''_{*d}	E''_*
Турбогенератор мощностью до 100 МВт	0,125	1,08
Турбогенератор мощностью 100—500 МВт	0,2	1,13
Гидрогенератор с успокоительными обмотками	0,2	1,13
Гидрогенератор без успокоительных обмоток	0,27	1,18
Синхронный компенсатор	0,2	1,2
Синхронный двигатель	0,2	1,1
Асинхронный двигатель	0,2	0,9
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Для приближенных расчетов можно воспользоваться средними относительными значениями X''_{*d} и E''_* , указанными в таблице 2.4.

В электроустановках напряжением до 1 кВ учет активного сопротивления ветви КЗ при расчете $I_{п0}$ является обязательным.

Способ расчета ударного тока КЗ зависит от требуемой точности расчета и конфигурации исходной схемы.

При расчете ударного тока КЗ с целью проверки проводников и электрических аппаратов по условиям КЗ допустимо считать, что амплитуда периодической составляющей тока КЗ в момент наступления ударного тока равна амплитуде этой составляющей в начальный момент КЗ.

В практических расчетах ударный ток находят при наибольшей апериодической составляющей. Наибольшее начальное значение апериодической составляющей при холостом ходе в предшествующем режиме и когда вектор напряжения проходит через нуль.

Ударный ток - это максимальное мгновенное значение полного тока КЗ, рассчитываемое по формуле:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot \sum_{i=1}^n I_{п0i} \cdot K_{удi}, \quad (9.11)$$

где $I_{п0i}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от i – й части схемы;

$K_{удi}$ – ударный коэффициент тока КЗ от от i – й части схемы, равный

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \quad (9.12)$$

T_a - постоянная времени затухания апериодического тока.

В сложной схеме сумму апериодических слагаемых заменяют одной, затухающей с эквивалентной постоянной времени

$$T_a = \frac{X_{рез}}{\omega \cdot R_{рез}}, \quad (9.13)$$

причем $X_{рез}$ - результирующее индуктивное сопротивление схемы, найденное при отсутствии всех активных сопротивлений ($R_{рез} = 0$), и $R_{рез}$ - результирующее активное сопротивление схемы при отсутствии всех индуктивных сопротивлений ($X_{рез} = 0$), найденных относительно точки КЗ.

В приближенных расчетах эквивалентную постоянную времени не определяют, а принимают усредненные значения ударного коэффициента для ветви с гидрогенераторами - $K_{удг} = 1,9$; для ветви с турбогенераторами - $K_{удт} = 1,8$; для ветви с системой – $K_{удс} = 1,4$.

Ударный ток КЗ для сложной схемы определяют по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot (I_{п0г} \cdot K_{удг} + I_{п0т} \cdot K_{удт} + I_{пс} \cdot K_{удс}). \quad (9.14)$$

При отдельном учете асинхронных двигателей и обобщенной нагрузки ударный ток в месте КЗ составляет:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot (I_{п0рез} \cdot K_{уд} + I_{п0дв} \cdot K_{уддв} + I_{пнаг}), \quad (9.15)$$

где $I_{п0рез}$, $K_{уд}$ - начальный сверхпереходный ток и ударный коэффициент от генераторов, синхронных двигателей и компенсаторов;

$I_{п0дв}$, $K_{уддв}$ - начальный сверхпереходный ток и ударный коэффициент асинхронных двигателей;

$I_{пнаг}$ - сверхпереходный ток обобщенной нагрузки.

Разделение слагаемых в общем ударном токе обусловлено тем, что генераторы, асинхронные двигатели и обобщенная нагрузка имеют различные ударные коэффициенты. Следует иметь в виду, что затухание периодической и апериодической составляющих тока, посылаемых асинхронным двигателем, происходит фактически с одинаковой постоянной времени. Поэтому в ударном коэффициенте для асинхронных двигателей учитывают одновременное затухание обеих составляющих тока и принимают его в пределах от 1,8 при

мощности двигателя 5 МВт до 1,6 при 0,2 МВт. Для мелких двигателей, а также для обобщенной нагрузки практически $K_{y0}=1$.

Удаленная от места КЗ нагрузка не оказывает существенного влияния на сверхпереходный ток, что позволяет ограничиться учетом только той нагрузки, которая расположена в непосредственной близости к точке КЗ. Это допущение упрощает расчет и дает удовлетворительные для практики результаты.

9.1.4 СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ, ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ. СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Анализ переходного процесса при несимметричных нарушениях режима производится на основе метода симметричных составляющих. Благодаря тому, что элементы энергосистем по своему конструктивному исполнению являются физически симметричными, для электрических систем справедлив принцип независимости действия симметричных составляющих, т.е. каждая последовательность (прямая, обратная, нулевая) может рассматриваться независимо от двух других.

Практический расчет поперечной и продольной несимметрии связан с составлением схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и нахождением результирующих сопротивлений каждой из названных схем (X_{1PE3} , X_{2PE3} , X_{0PE3}).

Схема прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют для расчета трехфазного КЗ. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени генераторы и нагрузки вводятся в нее соответствующими реактивностями и ЭДС.

Началом схемы прямой последовательности является объединенная точка нулевого потенциала, а ее концом - точка КЗ.

Схема обратной последовательности по своей конфигурации является полной копией схемы прямой последовательности, ЭДС всех генерирующих элементов в ней равны нулю, а генераторы, двигатели и обобщенная нагрузка (при необходимости ее учета) входят в нее реактивностями обратной последовательности, отличными от реактивностей прямой последовательности. Все остальные элементы входят теми же реактивностями, что и в схему прямой последовательности. Если точные значения сопротивлений обратной последовательности для генераторов и обобщенной нагрузки неизвестны, то принимают для турбогенераторов и машин с демпферными обмотками $X_2 = 1,22 X'_d$; для машин без демпферных обмоток $X_2 = 1,45 X'_d$. для обобщенной нагрузки поэтому $X_{*2H} = X_{*1H}$, $X''_H = 0,35$ в привязке к сетям 6 - 10 кВ и $X_{*2} = 0,45$ для сетей 35 кВ, считая ее отнесенной к полной рабочей мощности нагрузки (МВ-А) и среднономинальному напряжению ступени, где она присоединена.

Начало и конец схемы обратной последовательности совпадают соответственно с началом и концом схемы прямой последовательности. В приближенных расчетах принимают для генераторов и входящих в схему

нагрузок $X_2 = X_1$. Это освобождает от составления схемы замещения обратной последовательности и позволяет принимать

$$X_{2PE3} = X_{0PE3}.$$

Схема нулевой последовательности по своей конфигурации значительно отличается от схемы прямой последовательности в силу того, что токи нулевой последовательности представляют собой однофазный ток КЗ (I_0), протекающий в каждой фазе. Возвращение токов $3I_0$ происходит через землю, а если линия защищена тросом, то по тросу и земле.

Таким образом, контур токов нулевой последовательности имеет значительно большие геометрические размеры, чем контуры токов прямой и обратной последовательностей. В соответствии с этим и сопротивление нулевой последовательности значительно больше, чем сопротивления прямой и обратной последовательностей.

Конфигурация схемы нулевой последовательности в значительной степени определяется соединением обмоток участвующих в ней трансформаторов и автотрансформаторов.

Составление схемы замещения следует начинать от точки КЗ, считая, что все фазы в этой точке замкнуты накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. В цепях, электрически связанных с точкой КЗ, токи нулевой последовательности потекут лишь в сторону элементов, соединенных в Y_0 . В схему замещения войдут лишь те элементы схемы, через которые протекают токи нулевой последовательности. Чтобы избежать ошибок на первых этапах до приобретения практических навыков, необходимо в схему замещения нулевой последовательности вводить трансформаторы и автотрансформаторы их полной T-образной схемой с учетом ветви намагничивания $X_{\mu 0}$. В практических расчетах для любых конструкций трансформаторов принимают $X_{\mu 0} = \infty$. Поэтому, разорвав ветвь с $X_{\mu 0}$, получаем схему нулевой последовательности, соответствующую сделанному допущению, при этом трансформатор имеет $X_0 = X_1$ либо $X_0 = \infty$ и в схему не входит.

Как исключение следует иметь в виду, что при уточненных расчетах для трехстержневых трансформаторов $X_{\mu 0}$ необходимо учитывать как конечную величину ($X_{\mu 0} = 0,3-1,0$).

При составлении схемы замещения нулевой последовательности у студентов довольно часто возникают следующие затруднения: куда должно быть введено сопротивление, через которое заземлена нейтраль обмотки трансформатора или генератора, и непонимание причины, по которой концы ветвей, отображающие обмотки трансформатора, соединенные в треугольник, имеют в схеме нулевой потенциал.

Следует придерживаться следующего правила: сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, должно быть введено утроенной величиной последовательно с сопротивлением той обмотки, в нейтраль которой включено.

Если U_0 приложено со стороны обмоток, соединенных в Y и Y , то $X_0 = \infty$. Трансформатор входит в схему, если U_0 приложено со стороны обмотки Y_0 ; для

соединения $Y_0/Y_0 - X_0 = X_1$, для соединений $Y_0/Y - X_0 = \infty$, и для соединения $Y_0/\Delta - X_0 = X_1$. В последнем случае обмотка, соединенная в Δ , имеет в схеме нулевой потенциал. Это обусловлено тем, что в трансформаторе Y_0 / Δ токи нулевой последовательности, трансформируясь из первичной обмотки (Y_0) во вторичную (Δ), циркулируют по замкнутому контуру треугольника, не выходя за его пределы во внешнюю часть схемы, присоединенную за обмоткой Δ . То обстоятельство, что за обмоткой Δ заканчивается путь циркуляции тока нулевой последовательности в электрической схеме замещения, отражается тем, что конец обмотки, соединенной в Δ , связан сверхпроводником с землей. Сверхпроводник и шунтирует внешнюю часть схемы за трансформатором.

Началом схемы нулевой последовательности считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом, а ее концом - точку несимметрии.

Сопротивления элементов для схемы замещения нулевой последовательности в общем случае существенно отличаются от соответствующих значений для схем прямой последовательности:

1) синхронные машины имеют $X_0 = (0,15 \div 0,6)X''$. Как правило, обмотка трансформатора со стороны генератора имеет соединение Δ , что исключает ток нулевой последовательности в генераторах;

2) для обобщенной нагрузки X_0 определяется сопротивлениями входящих в нее элементов, в том числе и понижающих трансформаторов. Как правило,

3) вторичные обмотки питающих трансформаторов соединены в Δ , что исключает протекание токов нулевой последовательности собственно в нагрузке;

4) автотрансформаторы с глухим заземлением нейтрали имеют схему нулевой последовательности, аналогичную схеме соответствующего трансформатора;

5) токоограничивающие реакторы имеют $X_0 = X_1 = X_2$.

а) воздушные линии имеют X_0 значительно большее, чем сопротивление прямой (или обратной) последовательности. В практических расчетах принимают:

- одноцепная линия без тросов $X_0 = 3,5-X_1$;

- одноцепная линия со стальными тросами $X_0 = 3,0-X_1$;

- двухцепная линия без тросов при согласном течении тока в линиях $X_0 = 5,5-X_1$;

- двухцепная линия со стальными тросами при согласном течении токов в линиях $X_0 = 4,7-X_1$;

б) для кабельных линий принимают $R_0 = 10-R_1$, $X_0 = (3,5 - \text{г} - 4,6)X_1$.

9.1.5 ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ОДНОКРАТНОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИИ

Анализ переходного процесса в электрических системах при однократной поперечной несимметрии и практические методы его расчета изложены в [1, 2, 4].

Все виды несимметричных КЗ в одной точке системы являются различными видоизменениями однократной поперечной несимметрии.

Случаи однократной поперечной несимметрии системы встречаются на практике наиболее часто. Анализ переходного процесса при несимметричных коротких замыканиях производится на базе метода симметричных составляющих. Решающее значение в практической применимости этого метода для анализа несимметричных режимов имеет принцип независимости действия симметричных составляющих.

Согласно этому принципу в физически симметричной трехфазной системе напряжение любой последовательности может вызвать токи только одноименной последовательности, т.е. режимы в каждой из схем замещения (прямой, обратной и нулевой последовательностей) могут рассматриваться независимо друг от друга.

Применение теории симметричных составляющих к исследованию и расчету несимметричных коротких замыканий приводит к правилу эквивалентности прямой последовательности, в соответствии с которым ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ численно равен току трехфазного КЗ в фиктивной точке, удаленной от реальной точки на дополнительное реактивное сопротивление

$$I_{KA1}^{(n)} = \frac{E_{pezA}}{j(X_{Ipez} + \Delta X^{(n)})}, \quad (9.16)$$

где n - обозначает вид КЗ;

$\Delta X^{(n)}$ -дополнительное сопротивление в зависимости от вида КЗ;

Как известно, токи обратной и нулевой последовательностей и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ. Следовательно, задача расчета любого несимметричного КЗ состоит прежде всего в нахождении тока прямой последовательности $I_{1П}$ особой фазы (А) в месте короткого замыкания.

Модуль фазного тока в месте несимметричного КЗ в общем виде определяется выражением:

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{K1}^{(n)}, \quad (9.17)$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, зависящий от вида КЗ, который можно найти по данным таблицы 9.4.

Правило эквивалентности прямой последовательности: ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определён как ток при трёхфазном КЗ в точке, удалённой от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$.

В соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности все методы расчета трехфазного КЗ могут быть использованы для расчета токов и напряжений прямой последовательности любого несимметричного КЗ.

Расчет любого несимметричного КЗ в общем случае следует проводить по индивидуальному изменению в такой последовательности:

1) составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (или комплексную схему замещения) и выразить

сопротивления всех элементов в относительных единицах при выбранных базисных условиях;

2) наметить в схеме замещения прямой последовательности выделяемые генерирующие ветви и рассчитать для них коэффициенты распределения;

3) определить по соответствующим схемам их суммарные реактивности относительно места КЗ X_{1PE3} , X_{2PE3} , X_{0PE3} .

4) определить расчетные реактивности выделенных генерирующих ветвей

$$X_{расч} = \frac{(X_{1PE3} + \Delta X^{(n)}) \cdot S_{ном\Sigma}}{C_{Г1} \cdot S_{\phi}}, \quad (9.18)$$

где X_{1PE3} , $\Delta X^{(n)}$ - результирующая реактивность схемы замещения прямой последовательности и дополнительный реактанс в относительных единицах;

$S_{ном\Sigma}$, - суммарная номинальная мощность генераторов выделяемой вестии, мВА;

$C_{Г1}$ - коэффициент распределения для той же ветви в схеме прямой последовательности. Для ветви источника неограниченной мощности с коэффициентом распределения C_c .

Таблица 9.4 - Выражения симметричных составляющих токов и напряжений различных КЗ

Наименование и обозначение	Двухфазное КЗ $K^{(2)}$	Двухфазное КЗ на землю $K^{(1,1)}$	Однофазное КЗ $K^{(1)}$
1	2	3	4
Дополнительное $\Delta X^{(n)}$ сопротивление	X_{PE3}	$\frac{X_{PE30} \cdot X_{PE32}}{X_{PE30} + X_{PE32}}$	$X_{PE30} + X_{PE32}$
Коэффициент $m^{(n)}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{PE30} \cdot X_{PE32}}{(X_{PE30} + X_{PE32})^2}}$	3
Ток прямой последовательности $\underline{i}_{\kappa A1}^{(n)}$	$\frac{\dot{E}_{PE3}}{j(X_{PE31} + X_{PE32})}$	$\frac{\dot{E}_{PE3}}{j(X_{PE31} + \frac{X_{PE30} X_{PE32}}{X_{PE30} + X_{PE32}})}$	$\frac{\dot{E}_{PE3}}{j(X_{PE31} + X_{PE32} + X_{PE30})}$
Ток обратной последовательности $\underline{i}_{\kappa A2}^{(n)}$	$-\dot{i}_{\kappa A1}$	$-\dot{i}_{\kappa A1} \frac{X_{PE30}}{X_{PE30} + X_{PE32}}$	$\dot{i}_{\kappa A1}$
Ток нулевой последовательности $\underline{i}_{\kappa A0}^{(n)}$	0	$-\dot{i}_{\kappa A1} \cdot \frac{X_{PE32}}{X_{PE30} + X_{PE32}}$	$\dot{i}_{\kappa A1}$
Ток в фазе А $\dot{i}_{\kappa A}$	0	0	$3\dot{i}_{\kappa A1}$
Ток в фазе В $\dot{i}_{\kappa B}$	$a^2 \dot{i}_{\kappa A1} - a \dot{i}_{\kappa A1}$	$\dot{i}_{\kappa A1} (a^2 - \frac{a X_{PE30} + X_{PE32}}{X_{PE30} + X_{PE32}})$	0

1	2	3	4
Ток в фазе С $\dot{i}_{\kappa C}$	$a\dot{i}_{\kappa A1} - a^2\dot{i}_{\kappa A1}$	$\dot{i}_{\kappa A1} \left(a - \frac{a^2 X_{\text{рез}0} + X_{\text{рез}2}}{X_{\text{рез}0} + X_{\text{рез}2}} \right)$	0
Напряжение прямой последовательности $\dot{U}_{\kappa A1}$	$\dot{i}_{\kappa A1} j \cdot X_{\text{рез}2}$	$\dot{i}_{\kappa A1} \left(j \frac{X_{\text{рез}2} \cdot X_{\text{рез}0}}{X_{\text{рез}2} + X_{\text{рез}0}} \right)$	$j \cdot (X_{\text{рез}2} + X_{\text{рез}0}) \cdot \dot{i}_{\kappa A1}$
Напряжение обратной последовательности $\dot{U}_{\kappa A2}$	$\dot{i}_{\kappa A1} j \cdot X_{\text{рез}2}$	$\dot{i}_{\kappa A1} \left(j \frac{X_{\text{рез}2} \cdot X_{\text{рез}0}}{X_{\text{рез}2} + X_{\text{рез}0}} \right)$	$-j \cdot X_{\text{рез}2} \cdot \dot{i}_{\kappa A1}$
Напряжение нулевой последовательности $\dot{U}_{\kappa A0}$	0	$\dot{i}_{\kappa A1} \left(j \frac{X_{\text{рез}2} \cdot X_{\text{рез}0}}{X_{\text{рез}2} + X_{\text{рез}0}} \right)$	$-j \cdot X_{\text{рез}0} \cdot \dot{i}_{\kappa A1}$
Напряжение фазы А $\dot{U}_{\kappa A}$	$2\dot{i}_{\kappa A1} \cdot j \cdot X_{\text{рез}2}$	$3\dot{i}_{\kappa A1} \left(j \frac{X_{\text{рез}0} X_{\text{рез}2}}{X_{\text{рез}0} + X_{\text{рез}2}} \right)$	0
Напряжение фазы В $\dot{U}_{\kappa B}$	$-\dot{i}_{\kappa A1} j \cdot X_{\text{рез}2}$	0	$\dot{i}_{\kappa A1} j [X_{\text{рез}2} (a^2 - a) + X_{\text{рез}0} (a^2 - 1)]$
Напряжение фазы С $\dot{U}_{\kappa C}$	$-\dot{i}_{\kappa A1} j \cdot X_{\text{рез}2}$	0	$\dot{i}_{\kappa A1} j [X_{\text{рез}2} (a - a^2) + X_{\text{рез}0} (a - 1)]$
Ток в земле \dot{i}_3	0	$-3\dot{i}_{\kappa A1} \cdot \frac{X_{\text{рез}2}}{X_{\text{рез}0} + X_{\text{рез}2}}$	$3\dot{i}_{\kappa A1}$

Пример 1.1 Для исходной схемы на рис. 6 составить эквивалентную схему замещения при трехфазном КЗ в точке К и выполнить ее преобразование.

Решение. Схема замещения, соответствующая заданной расчетной схеме, изображена на рис. 7.

При расчете токов трехфазного КЗ (токов прямой последовательности) сопротивления трансформатора ТЗ и обмотки низшего напряжения трансформатора Т7 не учитываются.

По рисунку 7.

Преобразование схемы целесообразно начать с замены треугольника (Δ), который образуют сопротивления (X_{p1}, X_{m1}, X_{m2}) эквивалентной звездой (Y) с сопротивлениями (X_1, X_2, X_3):

$$X_1 = \frac{X_{T1} \cdot X_{p1}}{X_{T1} + X_{p1} + X_{T2}};$$

$$X_2 = \frac{X_{T2} \cdot X_{p1}}{X_{T1} + X_{p1} + X_{T2}};$$

$$X_3 = \frac{X_{T1} \cdot X_{T2}}{X_{T1} + X_{p1} + X_{T2}};$$

Затем последовательно сложить сопротивления:

$$X_4 = X_{л1} + X_{л2} + X_{см4};$$

$$X_5 = X_{нм4} + X_{л5} + X_{нм6};$$

$$X_6 = X_{см6} + X_c;$$

$$X_7 = X_{л4} + X_{см6};$$

$$X_8 = X_{н2} + X_{см7} + X_{см7}.$$

Источники с ЭДС $E_{Г3}$ и $E_{Н2}$ заменить эквивалентным источником:

$$E_1 = (E_{Н2} \cdot X_{Г3} + E_{Г3} \cdot X_{Н1}) / (X_{Г3} + X_{Н1});$$

с сопротивлением:

$$X_9 = [(X_{м5} + X_{Г3}) || X_{Н1}] + X_{см4}.$$

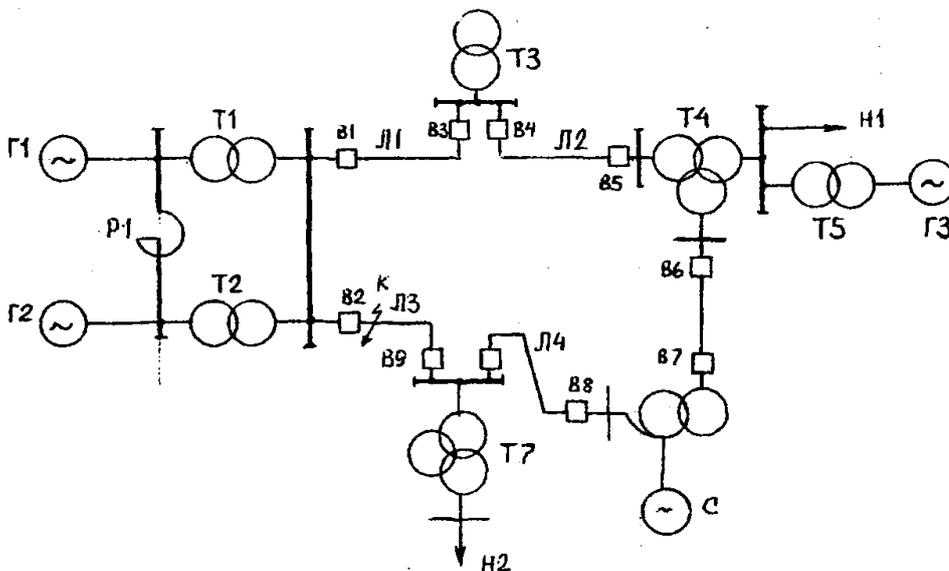


Рис. 6 - Исходная схема

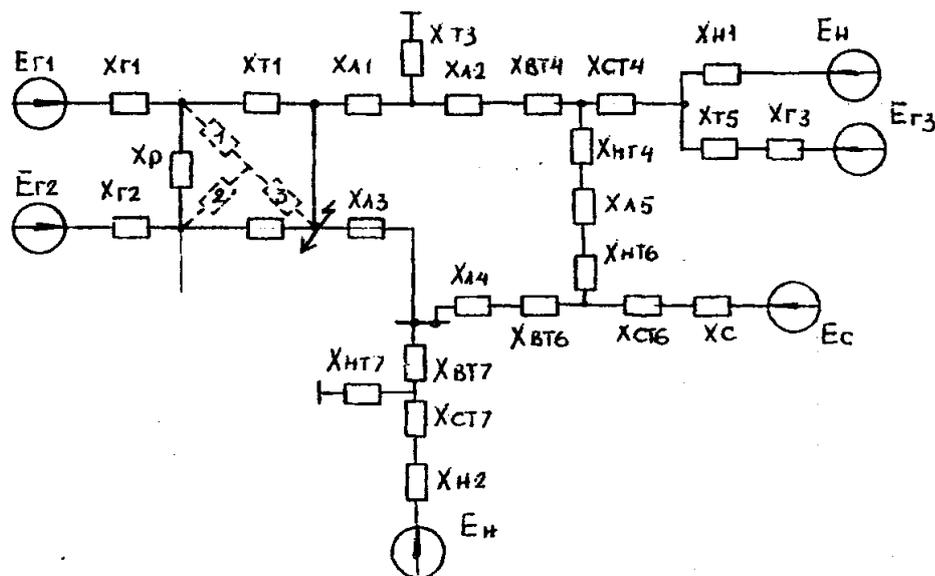


Рис. 7 - Схема замещения

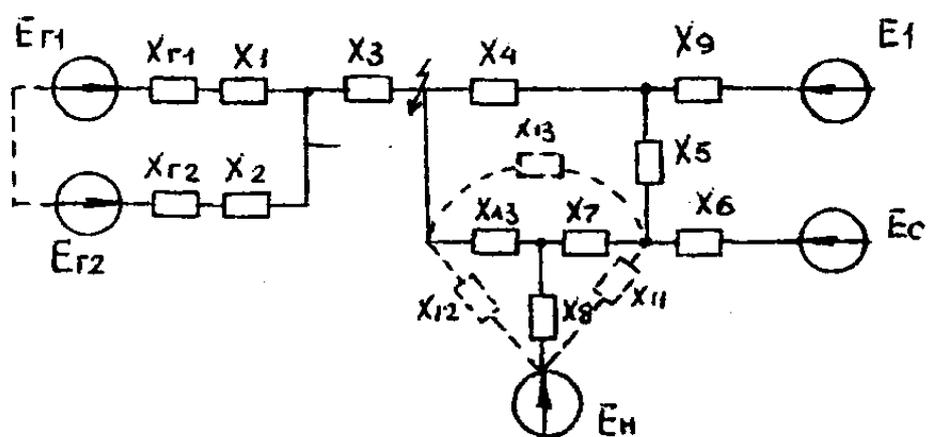


Рис. 8 – Преобразованная схема

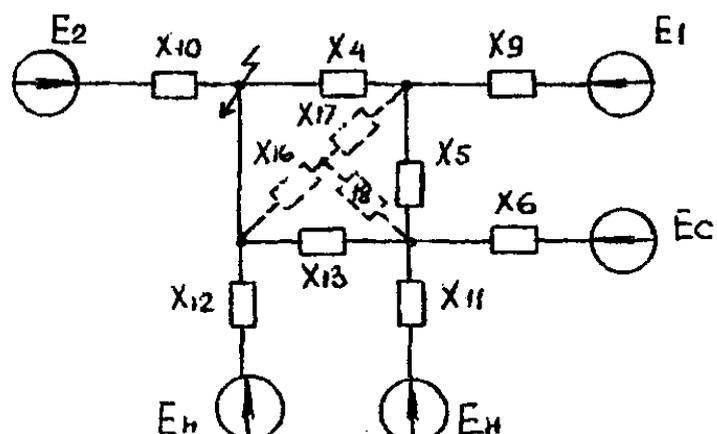


Рис. 9 – Преобразованная схема

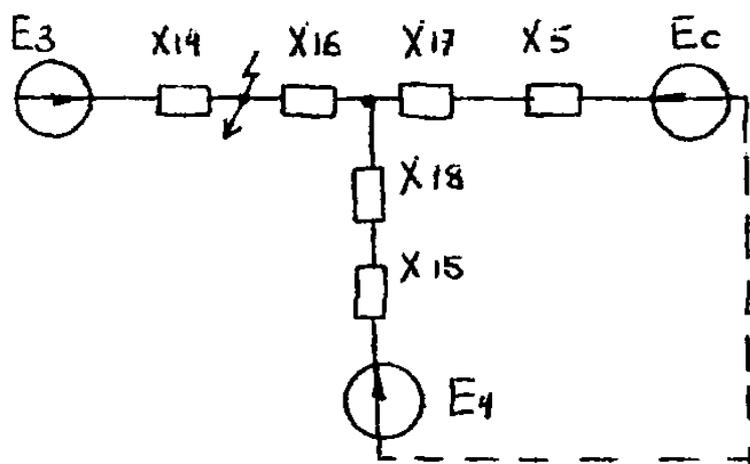


Рис. 10 – Преобразованная схема

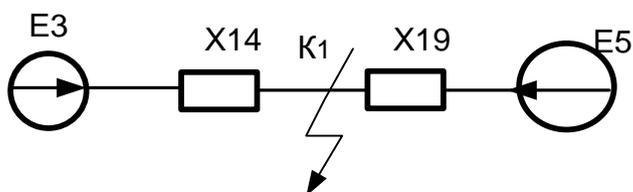


Рис. 11 – Преобразованная схема

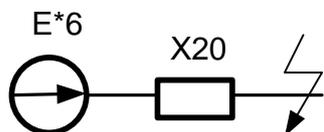


Рис. 12 – Преобразованная схема

По рисунку 8 делаем преобразования.

Источники с ЭДС $E_{г1}$ и $E_{г2}$ заменить эквивалентным $E_2 = E_{г1} = E_{г2}$ с сопротивлением $X_{10} = (X_{г1} + X_{г2}) \parallel (X_{г1} + X_{г2}) + X_3$.

Звезду (Y), которую образуют сопротивления $(X_{л3}, X_7, X_8)$, необходимо заменить эквивалентным треугольником с сопротивлениями (X_{11}, X_{12}, X_{13}) :

$$X_{11} = X_7 + X_8 + (X_7 \cdot X_8) / X_{л3};$$

$$X_{12} = X_{л3} + X_8 + (X_{л3} \cdot X_8) / X_7;$$

$$X_{13} = X_7 + X_{л3} + (X_7 \cdot X_{л3}) / X_8.$$

Полученный треугольник следует разрезать в точке, где приложена ЭДС E_n . В результате получается два источника с одинаковыми ЭДС E_n , подключенными соответственно через сопротивления X_{11} и X_{12} .

Преобразования по рисунку 9.

Источники с ЭДС E_2 и E_n заменить эквивалентным источником E_3 .

$E_3 = (E_2 \cdot X_{12} + E_n \cdot X_{10}) / (X_{12} + X_{10})$ с сопротивлением $X_{14} = X_{10} \parallel X_{12}$, а ЭДС E_n и E_e заменить $E_4 = E_n \parallel E_e$ с сопротивлением $X_{15} = X_{11} \parallel X_6$.

$\Delta(X_4, X_5, X_{13})$ преобразовать в $Y(X_{16}, X_{17}, X_{18})$.

Преобразования по рисунку 10.

$E_5 = E_4 \parallel E_c$ с сопротивлением $X_{19} = (X_{17} + X_5) \parallel (X_{18} + X_{15}) + X_{16}$

Преобразования по рисунку 11.

$E_{рез} = E_6 = E_3 \parallel E_5$ с результирующим сопротивлением $X_{рез} = X_{20} = X_{14} \parallel X_{19}$.

9.2 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УПРОЩЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

9.2.1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Изменения условий работы системы электроснабжения сопровождаются переходными процессами, которые приводят к изменению режимов СЭС и параметров ее системы. Совокупность процессов, характеризующих условия работы СЭС и ее состояние в любой момент времени, называется режимом

системы. Количественными показателями режима являются значения мощности, напряжения, тока и других величин, связанных между собой зависимостями через соответствующие параметры элементов системы.

К параметрам элементов системы относятся сопротивления и проводимости, коэффициенты трансформации, постоянные времени, коэффициенты усиления и другие параметры, определяемые физическими свойствами и схемой соединения элементов, а также расчетными данными.

В СЭС могут иметь место установившиеся или переходные режимы. Первые характеризуются неизменными или незначительными изменениями параметров элементов системы, вторые - быстрыми их изменениями во времени.

Основной задачей сохранения требуемого режима СЭС является поддержание таких параметров элементов системы, при которых обеспечивается устойчивость данного режима.

Устойчивость режима - это способность СЭС при внезапных случайных возмущениях ее режима сохранять допустимые значения параметров в узловых точках. Различают статическую и динамическую устойчивость.

Статической устойчивостью СЭС называют ее способность возвращаться к исходному установившемуся режиму после малых отклонений параметров ее элементов от допустимых пределов.

Динамическая устойчивость - это способность СЭС возвращаться после временного приложения внезапного и резкого возмущения к такому установившемуся режиму, при котором значения параметров режима в ее узловых точках находятся в допустимых пределах. Разновидностью динамической устойчивости является результирующая устойчивость - способность СЭС восстанавливать синхронную работу после кратковременного, допустимого по условиям эксплуатации, асинхронного режима с приемлемыми показателями качества электрической энергии.

К нарушениям динамической устойчивости СЭС может приводить такое внезапное возмущение, как отключение или включение одного из важных ее элементов (одной из двухцепных ЛЭП, мощных электродвигателей и др.), существенно изменяющее режим работы других элементов СЭС. Наиболее опасным возмущением являются КЗ, под действием которых система переходит в послеаварийный режим. Если параметры режима узловых точек СЭС в послеаварийном состоянии существенно не отличаются от параметров нормального режима, то считают, что динамическая устойчивость СЭС не нарушилась.

При нарушении статической или динамической устойчивости СЭС могут появиться различия в частотах ее элементов, снижения напряжения в системе до значений, неприемлемых для большинства потребителей.

9.2.2 ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Переходные процессы в электрических системах являются следствием изменения режимов, обусловленных эксплуатационными условиями, или результатами повреждений изоляции и токоведущих частей электроустановок.

Причинами возникновения переходных процессов могут быть многочисленные воздействия на элементы системы:

- включения, отключения и переключения источников электрической энергии, трансформаторов, линий электропередачи, электроприемников и других элементов;

- появление несимметрии токов и напряжений в результате отключения отдельных фаз, несимметричных изменений нагрузки, обрывов фаз и пр.;

- короткие замыкания в элементах системы;

- форсировка возбуждения синхронных машин и гашение их магнитного поля;

- внезапные набросы и сбросы нагрузки;

- синхронный пуск двигателей и компенсаторов;

- асинхронный ход синхронных машин после выпадения их из синхронизма;

- атмосферно - климатические воздействия на элементы электрической системы;

- повторные включения и отключения короткозамкнутых цепей.

9.2.3 ДОПУЩЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ СЭС

В практических расчетах устойчивости СЭС принимают ряд допущений, которые, упрощая анализ электромеханических переходных процессов, не приводят к существенным погрешностям их расчета. Полагают, что:

- электромеханические переходные процессы протекают при небольших изменениях частоты вращения роторов синхронных машин не более чем на 2-3%;

- активная электрическая мощность генератора, а также ток возбуждения изменяются мгновенно;

- изменения режима СЭС можно отразить в ее схеме, если ввести в нее новые значения ЭДС генераторов, мощностей, собственных и взаимных сопротивлений;

- несимметричные режимы с помощью комплексной схемы замещения можно привести к симметричным режимам. При этом считают, что изменения движения ротора вызваны только моментами, создаваемыми токами прямой последовательности;

- изменения сопротивлений генераторов и трансформаторов, обусловленные насыщением стали, можно не учитывать или учитывать приближенно уменьшением сопротивления схемы замещения до $(0,6-0,8) X''d$;

- результирующее потокосцепление обмотки возбуждения в продольной оси в течение всего переходного процесса постоянно, что соответствует постоянству

переходной ЭДС E' на зажимах генератора, приложенной за переходным сопротивлением $X'd$.

9.2.4 ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Связь между мощностью, отдаваемой генератором в сеть, и моментом электромагнитных сил, действующих на ротор, следующая:

$$P = M \cdot \omega, \quad (9.19)$$

$$\text{где } \omega = \omega_0 \frac{d\delta}{dt}.$$

При малых изменениях частоты вращения с небольшой погрешностью можно принять P^* , M^* , поэтому основное уравнение движения ротора генератора в относительных единицах можно записать в виде

$$P_T = P_{эл} + P_{пот} + T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt}, \quad (9.20)$$

где P_T – мощность турбины, определяющая исходный установившийся режим системы ($P_0 = P_T = P_{эл}$);

$P_{эл}$ – электромагнитная мощность генератора;

$P_{пот}$ – механические потери в агрегате;

$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2}$ – избыточный момент на валу генератора;

$P_d \frac{d\delta}{dt}$ – потери в демпферных обмотках при нарушении;

P_d – демпферный коэффициент;

δ – угол, определяющий пространственное положение продольной оси ротора;

T_J – постоянная инерции вращающихся масс турбины и генератора.

Если потерями мощности в агрегате и потерями в демпферных контурах пренебречь, то это уравнение примет вид

$$P_T - P_{эл} = T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_J \frac{d\omega}{dt} = T_J \cdot \alpha, \quad (9.21)$$

где ω – угловая скорость;

α – угловое ускорение вращающихся масс.

В установившемся режиме между неизменной мощностью первичного двигателя P_T и мощностью генератора $P_{эл}$ существует равновесие. При нарушении равновесия на валу машины возникает момент. В результате увеличения мощности генератора при неизменной мощности турбины равновесие вращающего и тормозящего моментов турбины и генератора нарушается $P_T - P_{эл} < 0$ ($P_{эл} > P_T$), и на валу машины возникает тормозящий момент. Уменьшение мощности генератора $P_T - P_{эл} > 0$ ($P_T > P_{эл}$) вызывает появление ускоряющего момента.

9.2.5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РОТОРА С ПОМОЩЬЮ СПОСОБА ПЛОЩАДЕЙ

Способ площадей позволяет определить размах колебаний ротора при отклонениях его от положения равновесия и найти тот предельный угол

отклонения аварийного участка система, при котором устойчивая работа может быть сохранена.

Предельный угол отклонения КЗ можно найти, не устанавливая характер переходного процесса смены режимов. Для этого используется способ площадей, позволяющий оценить соотношение изменения энергии в различных фазах процесса смены режимов работы СЭС. В качестве примера энергетически оценим переход из нормального в аварийный и послеаварийный режим простейшей системы, которая содержит генератор, работающий через трансформатор и двухцепную ЛЭП на шины- системы бесконечной мощности. Мощность данной системы настолько велика по сравнению с мощностью рассматриваемой электрической передачи, что напряжение на ее шинах можно считать неизменным по амплитуде и фазе при любых режимах (рисунок 13).

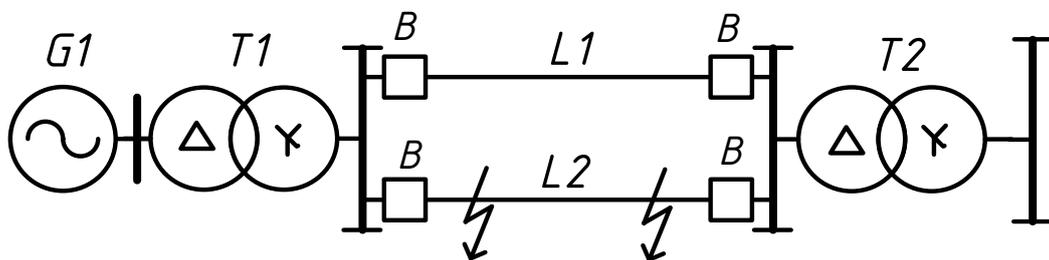


Рис. 13. Схема короткого замыкания в простейшей системе

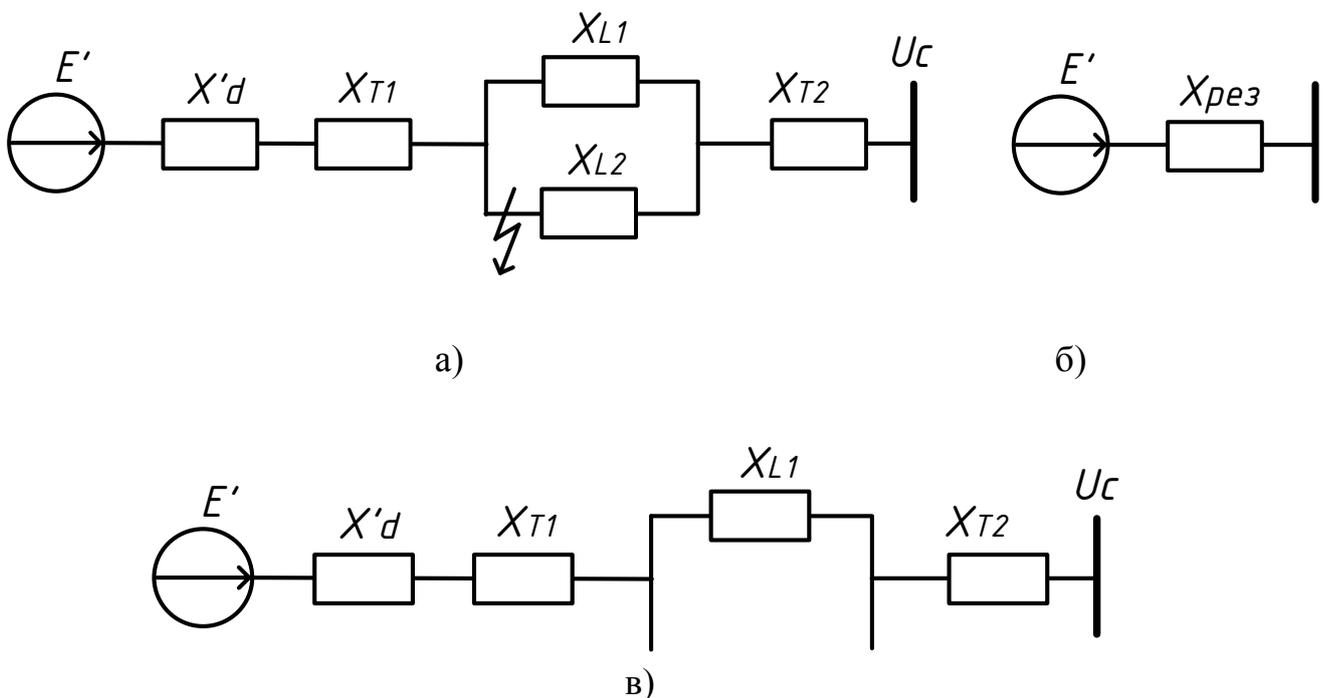


Рис. 14 - Схемы замещения (а, б) для нормального и послеаварийного (в) режимов

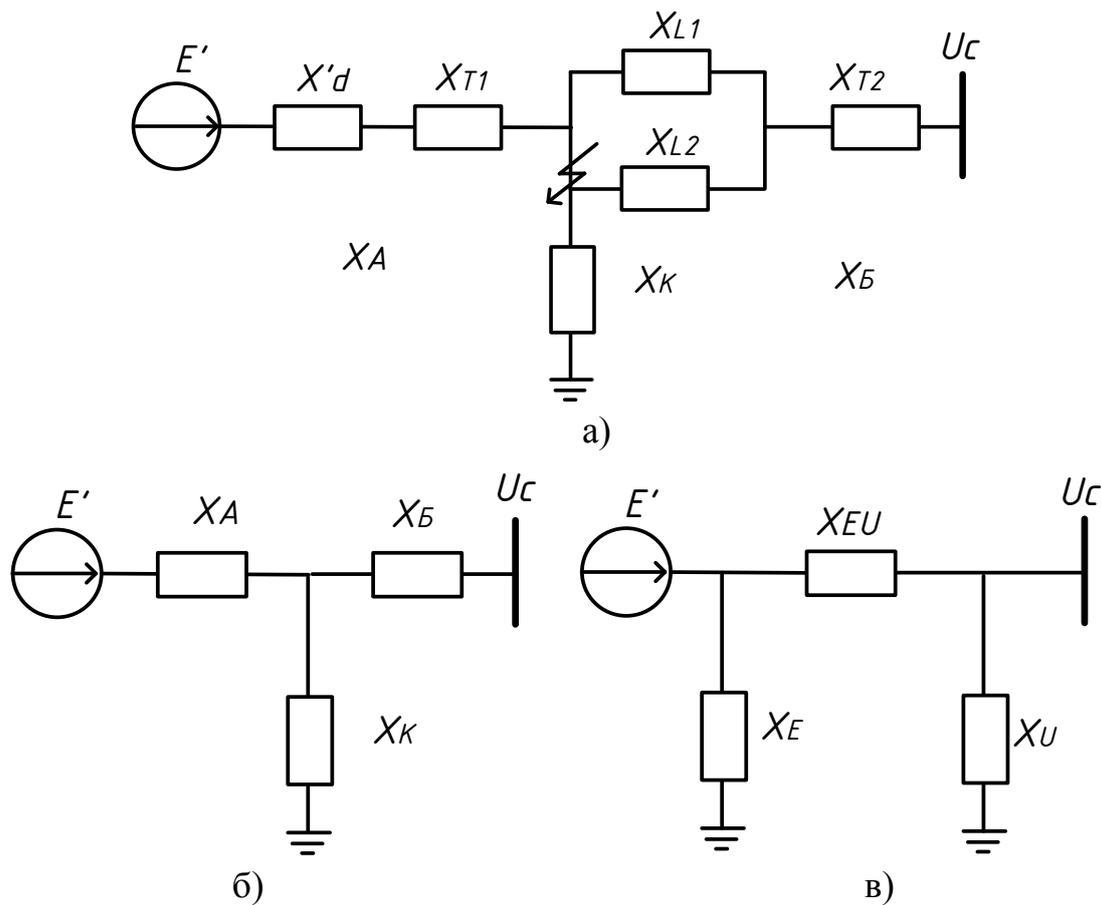


Рис. 15 - Схема замещения простейшей СЭС для аварийного режима (а) и ее преобразования (б, в)

В точке **K1** включено шунтирующее сопротивление КЗ $\Delta X^{(n)}$, состоящее из суммарных сопротивлений $X_{рез2}$ и $X_{рез0}$ обратной и нулевой последовательностей, определенное по тем же правилам, что и для расчета токов несимметричного КЗ. После возникновения КЗ мощность, передаваемая от генератора в систему, изменится, как и суммарное сопротивление $X_{Iрез}$, связывающее генератор с системой.

Результирующее сопротивление СЭС нормального режима

$$X_I = X'_d + X_{T1} + \frac{X_L}{2} + X_{T2}.$$

После отключения одной из цепей результирующее сопротивление после аварийного режима

$$X_3 = X'_d + X_{T1} + X_L + X_{T2}.$$

Схему замещения электропередачи для аварийного режима можно получить, если в точку КЗ включить шунтирующее сопротивление ΔX_k (рис. 13,а), значение которого зависит от вида КЗ:

$$X_k = 0 - \text{при трехфазном КЗ};$$

$$X_k = X_{рез2} - \text{при двухфазном КЗ};$$

$$X_k = X_{рез2} + X_{рез0} - \text{при однофазном КЗ};$$

$$X_K = \frac{X_{рез2} \cdot X_{рез0}}{X_{рез2} + X_{рез0}} - \text{при двухфазном КЗ на землю.}$$

Схему замещения, показанную на рисунке 14 а, можно последовательно преобразовать из «звезды» (рис. 14,б) в «треугольник» (рис. 14,в), в котором

$$X_E = X_A + X_K + \frac{X_A \cdot X_K}{X_B};$$

$$X_U = X_B + X_K + \frac{X_B \cdot X_K}{X_A};$$

$$X_{UE} = X_A + X_B + \frac{X_A \cdot X_B}{X_K}.$$

Сопrotивления X_E и X_U , подключенные непосредственно к ЭДС E' и напряжению U_c , называются собственными сопротивлениями. Данные сопротивления на активную мощность генератора в аварийном режиме существенно не влияют и могут не учитываться. При этом вся активная мощность генератора передается через сопротивление $X_{EU} = X_2$, связывающее ЭДС генератора E' с напряжением приемной системы U_c . Это сопротивление называют **взаимным сопротивлением**. С уменьшением сопротивления шунта X_K сопротивление X_{EU} увеличивается, что приводит к снижению амплитуды угловой характеристики мощности. Наиболее тяжелый аварийный режим будет при трехфазном КЗ в начале ЛЭП, когда сопротивление X_{EU} бесконечно велико, а амплитуда угловой характеристики мощности равна нулю. Самый легкий аварийный режим соответствует однофазному КЗ, при котором сопротивление шунта КЗ будет максимальным.

Смена состояний рассматриваемой системы представлена на рисунке 15 через угловые характеристики активной мощности.

Угловые характеристики мощности эквивалентного генератора для нормального, аварийного и послеаварийного режимов определяют по выражениям:

$$P_{*1} = \frac{E'_* \cdot U_{*c}}{X_{*1}} \sin \delta, \quad (9.22)$$

$$P_{*2} = \frac{E'_* \cdot U_{*c}}{X_{*2}} \sin \delta, \quad (9.23)$$

$$P_{*3} = \frac{E'_* \cdot U_{*c}}{X_{*3}} \sin \delta. \quad (9.24)$$

При расчетах электромеханических переходных процессов используется переходная ЭДС E'_* за переходным сопротивлением генератора

$$E'_* = \sqrt{\left(U_{*c} + \frac{Q_{*0} \cdot X_{PE3}}{U_{*c}} \right)^2 + \left(\frac{P_{*0} \cdot X_{PE3}}{U_{*c}} \right)^2}, \quad (9.25)$$

где активная мощность генератора в установившемся режиме обычно принимается равной $P_o = 0,6 \cdot P_{уст}$ ($P_{уст}$ – суммарная установленная мощность генераторов электрической станции).

Реактивная мощность в установившемся режиме $Q_{*o} = P_{*o} \cdot \operatorname{tg}\varphi$.

Изменяя угол δ от 0 до 180° , можно определить эквивалентную мощность генераторов для различных режимов. Результаты свести в таблицу 9.5.

Таблица 9.5 - Результаты расчетов угловых характеристик мощностей генераторов

δ , град	$\sin \delta$	P_{*1}	P_{*2}	P_{*3}
0				
20				
40				
60				
80				
90				
100				
120				
140				
160				
180				

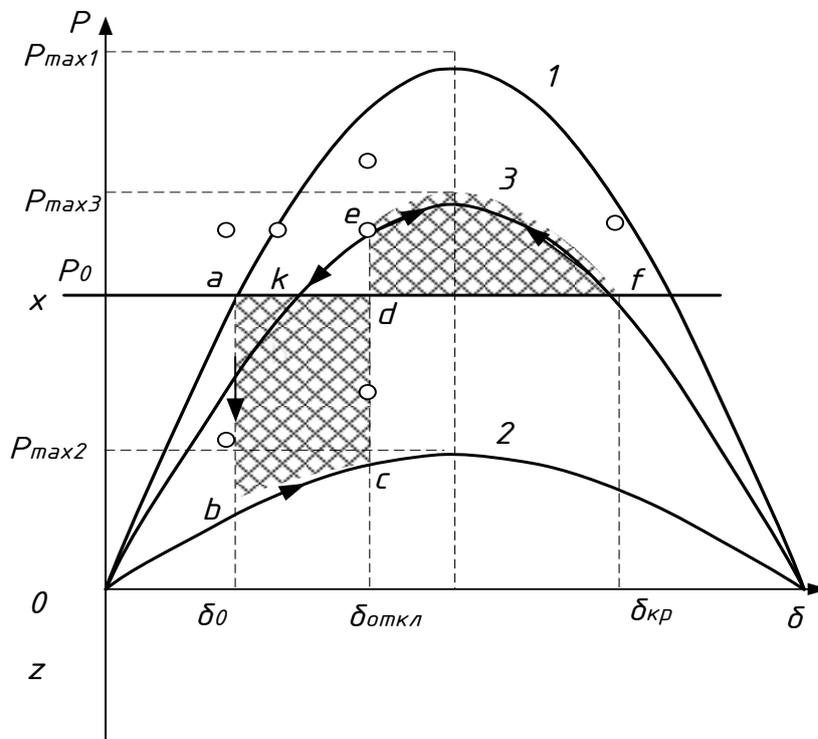


Рис. 16 - Угловые характеристики мощности эквивалентного генератора

Максимум передаваемой мощности, который называется идеальным пределом мощности, наступает при $\delta = 90^\circ$, если

$$P_{*max} = \frac{E'_* \cdot U_{*c}}{X_{*рез}}, \quad (9.26)$$

Угол сдвига фаз между ЭДС генератора и напряжением на шинах системы в установившемся режиме

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_{*0}}{P_{*max}}, \quad (9.27)$$

Рабочая точка *a* (рис. 16) в нормальном режиме соответствует координатам (P_0, δ_0), отражающим равенство мощности, развиваемой первичным двигателем генератора (турбиной), и мощности $P_0 = P_T(\delta_0)$, передаваемой генератором в сеть со сдвигом на угол δ_0 между ЭДС E' и напряжением U_c .

После внезапного отключения линии происходит сброс передаваемой генератором мощности и переход с характеристики мощности *1* на характеристику *2*. Из-за инерции ротора угол δ не может изменяться мгновенно, поэтому рабочая точка перемещается из точки *a* в точку *b*.

Поэтому режим будет характеризоваться точкой *b* на угловой характеристике мощности аварийного режима.

На валу, соединяющем турбину и генератор, возникает избыточный момент, определяемый разностью мощности турбины, которая не изменилась после отключения линии, и новой мощности генератора ($\Delta P = P_0 - P_{(0)}$). Под влиянием этой разности ротор машины начинает ускоряться, двигаясь в сторону больших углов δ . При этом рабочая точка режима перемещается по угловой характеристике мощности $P_2(\delta)$ в направлении увеличения угла δ ($\delta > \delta_0$) к точке *c*.

Если при каком-либо значении угла $\delta_{откл}$ поврежденная цепь отключится, то в этот момент произойдет изменение мощности генератора из точки *c* характеристики $P_2(\delta)$ в точку *e* характеристики $P_3(\delta)$. Мощность же первичного двигателя генератора во время переходного процесса, ввиду инерционности системы регулирования частоты вращения турбины, остается неизменной и равной P_0 .

После отключения КЗ электромагнитная мощность генератора будет больше механической мощности турбины ($P_{эл} > P_T$) и на его валу появится тормозящий момент, несмотря на это, ротор генератора еще некоторое время продолжает движение в сторону увеличения угла δ , пока не израсходуется запасенная им на пути от δ_0 до $\delta_{откл}$ кинетическая энергия. В этот период генератор покрывает избыток отдаваемой им электромагнитной мощности за счет кинетической энергии, запасенной им во время ускорения.

Если вся кинетическая энергия будет израсходована до достижения ротором генератора угла $\delta_{кр}$ (точка *f* на характеристике $P_3(\delta)$), то под действием избыточного тормозящего момента ротор начнет перемещаться в

обратном направлении по характеристике $P_3(\delta)$ и после нескольких колебаний перейдет в новый установившийся режим точка k с углом δ_k . Если ротор пройдет угол $\delta_{кр}$, то избыточный момент вновь станет ускоряющим. С увеличением угла δ ускоряющий момент ротор будет прогрессивно возрастать и генератор выйдет из синхронизма.

Рассмотренные переходные режимы системы при разных возмущениях позволяют сформулировать отличительные признаки статической и динамической устойчивости:

- при статической устойчивости в процессе появления возмущений мощность генератора изменяется по одной и той же угловой характеристике, а после их исчезновения параметры системы остаются такими же, как и до появления возмущений;

- при динамической устойчивости система переходит на другую угловую характеристику, причем после исчезновения возмущений ее параметры отличаются от первоначальных, но остаются в допустимых пределах.

Если отключению поврежденной цепи соответствует угол, то ротор генератора во время ускорения запасет кинетическую энергию

$$A_{уск} = \int_{\delta_0}^{\delta'_{откл}} \Delta P_2(\delta_0) \cdot d\delta = F_{abcd}, \quad (9.28)$$

которая соответствует площади F_{abcd} на рисунке 16, называемой площадью ускорения.

Отключение поврежденной цепи электропередачи приводит к возрастанию передаваемой в сеть мощности с $P_2(\delta_{откл})$ до $P_3(\delta_{откл})$. Так как $P_3(\delta_{откл}) > P_0$ то появляется тормозной момент для ротора генератора, соответствующий мощности $P_3(\delta_{откл}) = P_3(\delta_{откл}) - P_0$. Однако угол δ продолжает увеличиваться до тех пор, пока не будет израсходована запасенная во время ускорения вся кинетическая энергия ротора генератора.

Во время торможения может быть израсходована энергия, предельное значение которой для интервала изменения угла δ , равного $\delta_{откл} - \delta_{кр}$, определяется выражением

$$A_{ТОРМ} = \int_{\delta'_0}^{\delta_{кр}} \Delta P_3(\delta_0) \cdot d\delta = F_{def}. \quad (9.29)$$

Площадь F_{def} называется площадью торможения, и эта площадь соответствует кинетической энергии, которая может быть израсходована ротором генератора во время торможения.

Сохранению динамической устойчивости и возвращению рабочей точки режима в точку а соответствует условие

$$A_{уск} \leq A_{ТОРМ} \quad (9.30)$$

вытекающее из сравнения площадей F_{abcd} и F_{def} .

Математическое выражение через угловые характеристики мощности режимов записывается следующим образом:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{откл}} (P_0 - P_2) \cdot d\delta - \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{крит}} (P_3 - P_0) \cdot d\delta = 0.$$

Можно найти предельное по условию сохранения динамической устойчивости значение угла отключения поврежденной цепи ЛЭП:

$$\delta_{откл.лп} = \arccos \frac{P_0 (\delta_{кр} - \delta_{0l}) + P_{max3} \cdot \cos \delta_{кр} - P_{max2} \cdot \cos \delta_{0l}}{P_{max3} - P_{max2}}, \quad (9.31)$$

где P_{*max2} и P_{*max3} - максимальные значения мощностей, определенные соответственно по характеристикам послеаварийного и аварийного режимов;

$\delta_{кр}$ - критический угол, рад.

Способ площадей не дает возможности получить зависимость изменения угла во времени. Для ее определения необходимо решить основное дифференциальное уравнение движение ротора (9.21), то есть найти $\delta = f(t)$. Аналитическое решение его возможно только для частного случая, когда $P = P_2(\delta) = 0$, что происходит при трехфазном КЗ у шин генератора или на одной из цепей ЛЭП.

Если угол δ выразить в градусах, а постоянную времени T_j - в секундах, то предельное время отключения трехфазного КЗ можно найти

$$t_{откл.лп} = \sqrt{\frac{T_j (\delta_{откл.лп} - \delta_0)}{9000 P_0}} \quad (9.32)$$

9.2.6 РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ РОТОРА ГЕНЕРАТОРА МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Качественную оценку переходного процесса смены режимов выполняют по зависимости $\delta = f(t)$, которую получают численным решением уравнения движения ротора генератора $P_T - P_{эл} = T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2}$ методом последовательных интервалов. При этом можно учесть влияние управляющих воздействий на характер переходного процесса от регулирования возбуждения, изменения времени отключения поврежденного элемента, АПВ и т. д.

Переходный процесс, описываемый данным уравнением, разбивают на ряд равных интервалов времени Δt . В практических расчетах интервал времени берут в пределах 0,02-0,1 в зависимости от длительности КЗ и характеристик устройств системной автоматики. Переходный процесс рассматривают последовательно по интервалам. В каждом интервале времени избыток мощности (левая часть уравнения) считают неизменным и при этом допущении вычисляют приращение угла $\Delta \delta$.

В момент сброса мощности (момент КЗ) возникает избыток мощности ΔP_0 (рис. 17). Приращение угла в течение первого интервала времени Δt находят

при начальных условиях $\left(\frac{d\delta}{dt} \right)_{t=0} = 0$ и $\delta = \delta_0$ последовательным интегрированием уравнения (1):

$$\Delta\delta_1 = \frac{\Delta t^2 \cdot \Delta P_0}{2T_j}; \quad \delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1. \quad (9.33)$$

Во втором интервале времени ротор генератора движется под действием избытка мощности $\Delta P = P_0 - P_{max2} \cdot \sin\delta_1$ и некоторой начальной скорости, приобретенной в первом интервале:

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{t=1} = \frac{\Delta t(\Delta P_0 + \Delta P_1)}{2T_j}. \quad (9.34)$$

Решив уравнение переходных процессов относительно приращения угла во втором интервале времени, получим

$$\Delta\delta_2 = \frac{\Delta t^2 \Delta P_1}{2T_j} + \Delta t \left(\frac{d\delta}{dt}\right)_1. \quad (9.35)$$

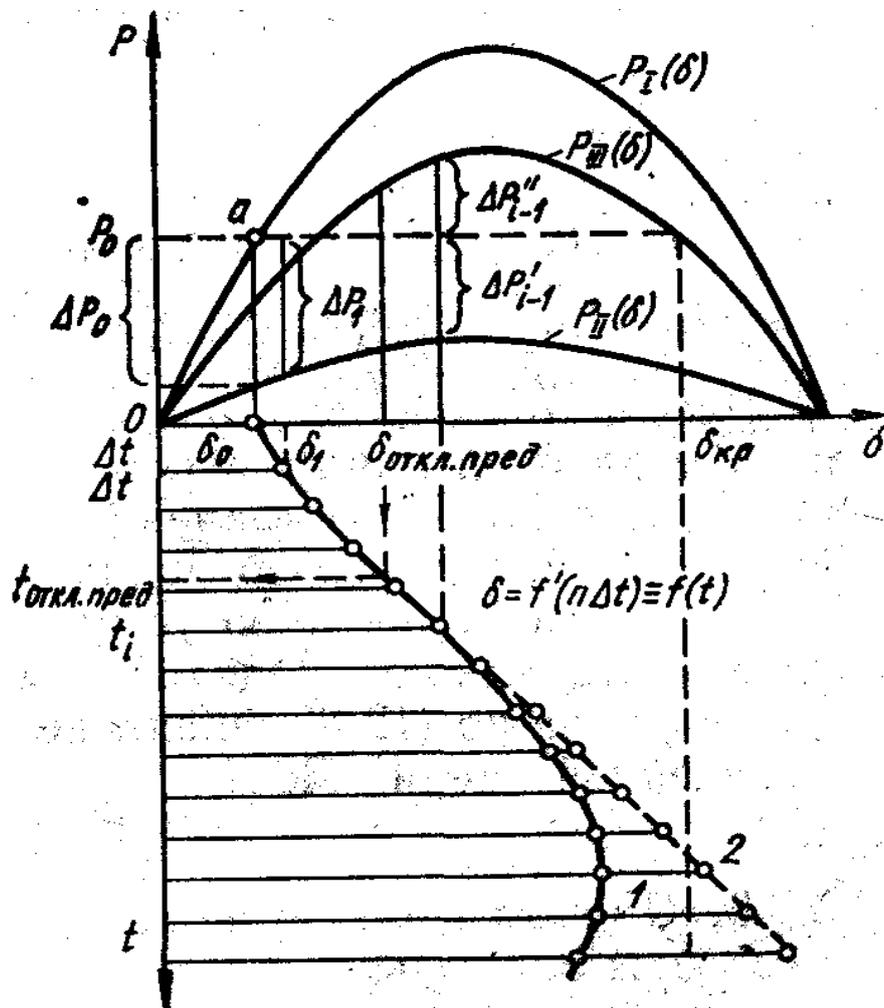


Рис. 17 - К расчету динамической устойчивости системы методом последовательных интервалов

После преобразования (9.33) с учетом (9.34) и (9.35) найдем

$$\Delta\delta_2 = \Delta\delta_1 + \frac{\Delta t^2 \Delta P_1}{T_j}. \quad (9.36)$$

Если постоянную инерции T_J и время Δt выразить в секундах, углы $\Delta\delta_1$ и $\Delta\delta_2$ - в градусах и ввести постоянную $k = \frac{18000 \Delta t^2}{\dot{\theta}_j}$, то выражение (9.36)

примет вид

$$\Delta\delta_2 = \Delta\delta_1 + k\Delta P_1. \quad (9.37)$$

Для n -го интервала времени по аналогии запишем

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + k\Delta P_{n-1}. \quad (9.38)$$

Если в i -м интервале времен и происходит изменение режима с переходом из одной угловой характеристики мощности на другую, то приращение угла определяется выражением

$$\Delta\delta_i = \Delta\delta_{i-1} + 0,5k(\Delta P''_{i-1} + \Delta P''_{i-1}). \quad (9.39)$$

Расчет точек кривой $\delta = f(n\Delta t)$ следует выполнять до тех пор, пока угол δ не начнет уменьшаться по кривой 1 (см. рис. 17), что соответствует сохранению устойчивости, или пока не будет установлено, что угол δ продолжает возрастать по кривой 2, соответствующей нарушению устойчивости. По кривой $\delta = f(t)$ можно определить также предельное время отключения КЗ, используя вычисленное по (3.11) значение предельного угла отключения поврежденной цепи ЛЭП.

Пример 1.2. Определить предельное время отключения поврежденной цепи ЛЭП в СЭС, схема которой изображена на рисунке 13 при трехфазном КЗ в начале линии.

Решение. Предельное время отключения трехфазного КЗ можно определить по предельному углу отключения, значение которого найдем по методу площадей. Для этого построим угловые характеристики мощности для нормального и послеаварийного режимов. Для этого построим угловые характеристики мощности для нормального и послеаварийного режимов. В аварийном режиме при трехфазном КЗ мощность, передаваемая в сеть, равна нулю.

Схемы замещения СЭС для нормального и послеаварийного режимов показаны на рисунке 14,б и в. Результирующие сопротивления в нормальном режиме

$$X_{*1} = X_{*d} + X_{*Tp1} + 0,5X_{*wl} + X_{*Tp2} = 0,183 + 0,143 + 0,312 + 0,117 = 0,754;$$

в послеаварийном режиме

$$X_{*3} = X_{*d} + X_{*Tp1} + X_{*l} + X_{*Tp2} = 0,183 + 0,142 + 0,624 + 0,117 = 1,066.$$

Угловые характеристики мощности: в нормальном режиме

$$P_{*1} = \frac{E'_* \cdot U_{*c} \cdot \sin \delta}{X_{*1}} = \frac{1,33 \cdot 1 \cdot \sin \delta}{0,754} = 1,77 \sin \delta;$$

в послеаварийном режиме P .

$$P_{*3} = \frac{E'_* \cdot U_{*c} \cdot \sin \delta}{X_{*3}} = \frac{1,33 \cdot 1 \cdot \sin \delta}{1,066} = 1,25 \sin \delta.$$

По характеристике нагрузки и угловым характеристикам мощности находим: угол между E'_* и U_{*c} в нормальном режиме

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_{*0}}{P_{*max1}} = \arcsin \frac{1}{1,77} = 34,4^{\circ};$$

критический угол в послеаварийном режиме

$$\delta_{кр} = \arcsin \frac{P_{*0}}{P_{*max3}} = \arcsin \frac{1}{1,25} = 126,9^{\circ}.$$

Предельный угол отключения поврежденной цепи ЛЭП при $P_{*2} = 0$.

Предельное время отключения трехфазного КЗ

$$\delta_{откл.п.р} = \arccos \frac{P_0 (\delta_{кр} - \delta_{01}) + P_{max3} \cdot \cos \delta_{кр} - P_{max2} \cdot \cos \delta_{01}}{P_{max3} - P_{max2}} =$$

$$= \arccos \frac{1(126,9 - 34,4) \frac{\pi}{180} + 1,25 \cdot \cos 126,9}{1,25} = 46,6^{\circ}$$

Предельное время отключения трехфазного КЗ

$$t_{откл.п.р} = \sqrt{\frac{T_J (\delta_{откл.п.р} - \delta_0)}{9000 P_0}} = \sqrt{\frac{12,9(46,5 - 34,4)}{9000 \cdot 1}} = 0,13с.$$

Пример 2.3. Проверить динамическую устойчивость СЭС из предыдущего примера при переходящем двухфазном КЗ на землю в начале одной линии ЛЭП с последующим трехфазным АПВ. Длительность КЗ $t=0,2с$, продолжительность бестоковой паузы АПВ $t_{АПВ}=0,4с$. Параметры элементов системы в аварийном режиме: $X_{*2Г}=0,142$; $X_{*2тр1}=X_{*0тр1}=X_{*тр1}$; $X_{*2тр2}=X_{*0тр2}=X_{*тр1}$; $X_{*2л}=X_{*л}$; $X_{*0л}=2,06$.

Решение. Оценим устойчивость СЭС при двухфазном КЗ по характеру изменения угла δ во времени. Эту зависимость рассчитаем методом последовательных интервалов.

Угловые характеристики мощности для нормального и послеаварийного режимов рассчитаны в примере 1. Определим угловую характеристику мощности системы в аварийном режиме.

Схема замещения СЭС для этого режима показана на рисунке 15,в, где дополнительное сопротивление, обусловленное несимметрией, определяется через результирующее сопротивление обратной последовательности:

$$X_{*2рез} = \frac{(X_{*2Г} + X_{*2мп1}) \cdot (0,5 \cdot X_{*2л} + X_{*2мп2})}{X_{*2Г} + X_{*2мп1} + 0,5 \cdot X_{*2л} + X_{*2мп2}} =$$

$$= \frac{(0,142 + 0,142) \cdot (0,312 + 0,117)}{(0,142 + 0,142 + 0,312 + 0,117)} = 0,17$$

и результирующее сопротивление нулевой последовательности

$$X_{*0рез} = X_{*0мп1} \frac{(0,5 \cdot X_{*0л} + X_{*0мп2})}{X_{*0мп} + 0,5 \cdot X_{*0л} + X_{*0мп2}} = 0,142 \cdot \frac{(1,03 + 0,117)}{(0,142 + 1,03 + 0,117)} = 0,126.$$

Так как $\Delta X_* = \frac{(X_{*2\text{pez}} + X_{*0\text{pez}})}{X_{*2\text{pez}} + X_{*0\text{pez}}} = \frac{(0,17 + 0,126)}{(0,17 + 0,126)} = 0,072$, то взаимное

сопротивление между рассматриваемыми точками системы в аварийном режиме

$$X_{*2} = \frac{(X_{*d} + X_{*mp1}) + (0,5 \cdot X_{*л} + X_{*mp2}) + (X'_{*d} + X_{*mp1}) \cdot (0,5 \cdot X_{*л} + X_{*mp2})}{\Delta X_*}$$

$$= \frac{0,754 + (0,183 + 0,142) \cdot (0,312 + 0,117)}{(0,072)} = 2,66$$

Уравнение угловой характеристики мощности

$$P_{*2} = \frac{E'_* \cdot U_{*c}}{X_{*2}} \cdot \sin \delta = \frac{1,33 \cdot 1 \cdot \sin \delta}{2,66} = 0,5 \sin \delta.$$

Рассчитаем зависимость $\delta = f(t)$, приняв длительность интервала $\Delta t = 0,1 \text{ с}$, при котором постоянная

$$K = 18000(\Delta t)^2 / T_j = 18000 \cdot 0,1^2 / 12,9 = 14.$$

Первый интервал. Угол δ_0 в момент возникновения КЗ остается неизменным, а мощность снижается до значения

$$P_{(0)} = P_{\text{max}2} \sin \delta_0 = 0,5 \cdot \sin 34,4^\circ = 0,282.$$

Избыток мощности в начале первого интервала

$$\Delta P_{*0} = P_{*0} - P_{(0)} = 1 - 0,282 = 0,718.$$

Приращение угла δ_1 , в течение первого интервала

$$\Delta \delta_1 = K \Delta P_{*0} / 2 = 14 \cdot 0,718 / 2 = 5^\circ.$$

Угол δ_1 в конце первого интервала

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta \delta_1 = 34,4 + 5 = 39,4^\circ$$

Второй интервал.

Мощность генератора в конце первого интервала

$$P_{*1} = P_{\text{max}2} \sin \delta_1 = 0,5 \sin 39,4^\circ = 0,318.$$

Избыток мощности в начале второго интервала

$$\Delta P_{*1} = P_{*0} - P_{*1} = 1 - 0,318 = 0,682$$

Приращение угла $\Delta \delta_2$ в течение второго интервала

$$\Delta \delta_2 = \Delta \delta_1 + K \Delta P_{*1} = 5 + 14 \cdot 0,682 = 14,5^\circ.$$

Угол δ_2 в конце второго интервала

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta \delta_2 = 39,4 + 14,5 = 53,9^\circ.$$

Третий интервал. В начале третьего интервала происходит отключение поврежденной цепи ЛЭП. Мощность генератора и избыток мощности до отключения поврежденной цепи

$$P'_{*2} = P_{\text{max}2} \sin \delta_2 = 0,5 \sin 53,9^\circ = 0,404;$$

$$\Delta P'_{*2} = P_{*0} - P'_{*2} = 1 - 0,404 = 0,596.$$

Мощность генератора и избыток мощность после отключения поврежденной цепи

$$P''_{*2} = P_{\text{max}2} \sin \delta_{2,25} \sin 53,9^\circ = 1,01;$$

$$\Delta P''_{*2} = P_{*0} - P''_{*2} = 1 - 1,01 = -0,01.$$

Приращение угла $\Delta\delta_3$ в третьем интервале

$$\Delta\delta_3 = \delta_2 + 0,5K \cdot (\Delta P'_{*2} + \Delta P''_{*2}) = 14,5 + 0,5 \cdot 14(0,596 - 0,01) = 18,5^\circ$$

Угол δ_3 в конце третьего интервала

$$\delta_3 = \delta_2 + \Delta\delta_3 = 53,9 + 18,5 = 72,4^\circ$$

Расчет *четвертого* и *пятого интервалов* выполняем так же, как и расчет второго интервала, только мощность генератора уже вычисляется по угловой характеристике мощности послеаварийного режима.

В начале шестого интервала (при $t = t_{КЗ} + t_{АПВ} = 0,2 + 0,4 = 0,6с$) срабатывает устройство АПВ. Расчет шестого интервала выполняем аналогично расчету третьего интервала, только используем угловые характеристики мощности послеаварийного и нормального режимов.

Последующие интервалы рассчитываем аналогично расчету второго интервала, только используем угловую характеристику мощности нормального режима.

Результаты расчетов сведены в таблицу 9.6.

Полученные данные свидетельствуют о том, что динамическая устойчивость СЭС при двухфазном КЗ на землю с последующим трехфазным АПВ сохраняется. Без АПВ система не сохранила бы устойчивость, так как предельный угол отключения двухфазного КЗ на землю

$$\delta_{откл.пр} = \arccos \frac{P_0 (\delta_{KP} - \delta_{01}) + P_{max3} \cdot \cos \delta_{KP} - P_{max2} \cdot \cos \delta_{01}}{P_{max3} - P_{max2}}$$

$$= \arccos \frac{1 \cdot (126,9 - 34,4) \cdot \frac{\pi}{180} + 1,25 \cdot \cos 126,9 - 0,5 \cdot \cos 34,4^\circ \cdot \delta_0}{1,25 - 0,5} = 53^\circ$$

а при фактической длительности КЗ $t_{КЗ} = 0,2с$ угол отключения КЗ больше и равен $53,9^\circ$ (см.таблицу 9.6).

Таблица 9.6 - Результаты расчетов динамической устойчивости

t,с	δ , град	P.	DP.	$\Delta\delta$,град	Примечание
0	34,4	0,282	0,718	5	Расчет по P_{*2} (5)
0,1	39,4	0,318	0,682	14,5	То же
0,2	53,9	0,404	0,596	18,5	Переход с P_{*2} (8)
		1,01	-0,01		на P_{*3} (5)
0,3	72,4	1,19	-0,19	15,8	Расчет по P_{*3} (5)
0,4	88,2	1,25	-0,25	12,3	То же
0,5	100,5	1,23	-0,23	9,1	То же
0,6	109,1	1,18	-0,18	3,1	Переход с P_{*3} (S)
		1,67	-0,67		на P_{*1} (5)
0,7	112,2	1,64	-0,64	-5,9	Расчет по P_{*1} (5)
0,8	106,3	—	—	—	То же

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ОБРАЗЦЫ ОФОРМЛЕНИЯ ОСНОВНОЙ НАДПИСИ

Форма 1 - Основная надпись для заглавных листов пояснительной записки

						<i>КП 13.03.02.0000.000 ПЗ</i>			
<i>Изм</i>	<i>Кол.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разработал</i>						<i>ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ</i>	<i>Стадия</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Проверил</i>							У		
<i>Н. контроль</i>							<i>РИИ, гр. ЭиЭ-</i>		
<i>Утвердил</i>									

Форма 2 – Основная надпись для последующих листов пояснительной записки

						<i>КП 13.03.02.0000.000 ПЗ</i>			<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Кол.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

Министерство образования и науки Российской Федерации



Рубцовский индустриальный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»

Факультет _____
Кафедра _____
наименование кафедры

Курсовой проект защищен с оценкой _____
Руководитель работы _____
подпись и.о. фамилия

“ _____ ” _____ 20__ г.
дата

_____ тема работы

**Пояснительная записка
к курсовому проекту**

по дисциплине _____
наименование дисциплины

_____ обозначение документа

Студент группы _____ и.о., фамилия

Руководитель
работы _____ должность, ученое звание и.о., фамилия

Рубцовск 20__

Татарникова Анна Николаевна

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Задания и методические указания к выполнению курсового проекта для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 29.12.2016. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 3,63. Тираж 80 экз. Заказ 161601. Рег. № 54.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/б.