

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике»

**Задания и методические указания**  
к контрольной работе по дисциплине  
**Переходные электромагнитные**  
**процессы в энергетических системах**

Автор  
Шелест В.А.



Ростов-на-Дону, 2025

## Аннотация

Задания и методические указания к контрольной работе предназначены для подготовки бакалавров заочной формы обучения по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и профилю «Электроэнергетические системы и сети».

## Автор

к.т.н., доцент кафедры «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике»  
Шелест В.А.



## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ.....	5
1.ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ КЗ И ПРИВЕДЕНИЕ ВЕЛИЧИН РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ.....	6
2.ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕРХПЕРЕХОДНОГО И УДАРНОГО ТОКОВ КЗ.....	11
3.ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТОКА КЗ.....	14
4.ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КЗ.....	16
5.ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КЗ В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ СЕТИ.....	18
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>21</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Специалистам в энергетике необходимо иметь современное научное глубокое понимание физики протекающих в энергосистемах процессов.

Контрольная работа предназначена для развития у студентов навыков самостоятельного расчета длительных нормальных и кратковременных аварийных режимов в энергосистемах.

Практические задачи, при решении которых инженер-электрик сталкивается с необходимостью оценки уровней токов коротких замыканий, многочисленны и разнообразны. Все они объединены единой целью – обеспечить надежность работы отдельных элементов электроустановки и всей электроэнергетической системы в целом. Проектируя и эксплуатируя электрические системы, нужно рассчитать электромагнитные процессы при внезапных возмущениях. Под этим понимают вычисление максимально возможных токов коротких замыканий (КЗ) для выбора оборудования и токоведущих частей по условиям термической и динамической устойчивости.

Инженер должен представлять энергосистему как живой, динамично развивающийся организм. Основной задачей является поддержание требуемого режима работы энергосистемы путём ограничения изменений параметров режима в таких пределах, при которых сохраняется её устойчивость.

Настоящие методические указания должны помочь студентам овладеть техникой упрощенных расчетов токов КЗ в различных аварийных режимах. На конкретном примере контрольного задания показан порядок расчета и анализ получающихся общих результатов. Указания способствуют созданию у студентов достаточно четких представлений о некоторых расчетных методах и применяемых при различных допущениях способах расчета.

## ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ.

### Оформление контрольной работы и отчета по домашним заданиям:

- Контрольная работа по заданию пишется техническим языком, не допускается использования бытовых речевых оборотов, разговорной речи, а также дословное переписывание материала из литературных источников.
- Контрольная работа должна быть оформлены в соответствии с «Правилами оформления письменных работ обучающимися для технических направлений подготовки».
- Титульный лист необходимо сверить с последним образцом возле аудитории 10-311.
- Работу следует сброшюровать.
- Работа должна быть подписана студентом.

### Проверка контрольной работы и допуск к экзамену:

- Проверив работу, преподаватель проставляет оценку «зачтена» или «не зачтена», а также отмечает её недостатки
- Оценка «зачтено» предполагает, что студент допускается к сдаче экзамена по дисциплине «Переходные электромагнитные процессы в электроэнергетических системах».
- К экзамену студент должен освоить все темы программы курса.
- При подготовке к экзамену тщательно проработайте лекционный и учебный материал.

## 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ КЗ И ПРИВЕДЕНИЕ ВЕЛИЧИН РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Для схемы на рисунке 1.1 определить начальный (сверхпереходный) ток трехфазного КЗ в точке К1 без учета активных сопротивлений и в точке К2 с учетом активного сопротивления кабеля. Расчет провести четырьмя способами:

- в именованных единицах с точным приведением сопротивлений;
- в относительных единицах с точным приведением сопротивлений;
- в именованных единицах с приближенным приведением сопротивлений;
- в относительных единицах с приближенным приведением сопротивлений.

Параметры схем приводятся в табл. 1, 2, 3 и 4. Схему рис.1.1 следует изображать после выборки параметров из табл. 1 и 2. Все параметры для удобства наносятся на исходную схему, как это показано (для примера) на схеме рис. 1.1. Для помощи при решении задачи следует использовать [1,2 и 3] или пример 1.1 [7, с. 21].

### Порядок решения задачи

1. Составляется схема замещения. При этом по возможности она сразу упрощается. Однотипные генераторы и трансформаторы, включенные параллельно, двухцепные ЛЭП объединяются и замещаются одним сопротивлением.

Таблица 1. Данные по первой цифре варианта для генераторов.

1-я цифра варианта	Тип электростанции	Генераторы				
		Число и мощность генераторов, МВт	$\tilde{\sigma}_d''$ , , *Н	$\tilde{\sigma}_2$ , , *Н	$\cos \varphi_i$	$\tilde{O}_a^{(3)}$ , , с
1	ТЭЦ	2×100	0,192	0,234	0,80	0,4
2	ТЭЦ	3×150	0,213	0,25	0,85	0,408
3	ГЭС	4×60	0,14	0,222	0,8	0,35
4	ГЭС	6×50			0,8	0,32

Таблица 2. Данные по первой цифре варианта для трансформаторов.

1-я цифра варианта	Трансформаторы электростанции			Автотрансформаторы подстанции				
	Число и мощность трансформаторов, МВА	$U_K$ , %	$P_K$ , кВт	Число и мощность трансформаторов, МВА	$U_K$ , %			$P_K$ , кВт
					В-С	В-Н	С-Н	
1	2×100	11	340	2×63	11	35	22	265
2	3×160	12	500	2×40	10,5	18	6	170
3	2×125	11	470	2×80	22	12,5	28	310
4	3×100	12	340	2×100	12,5	12,5	28	340

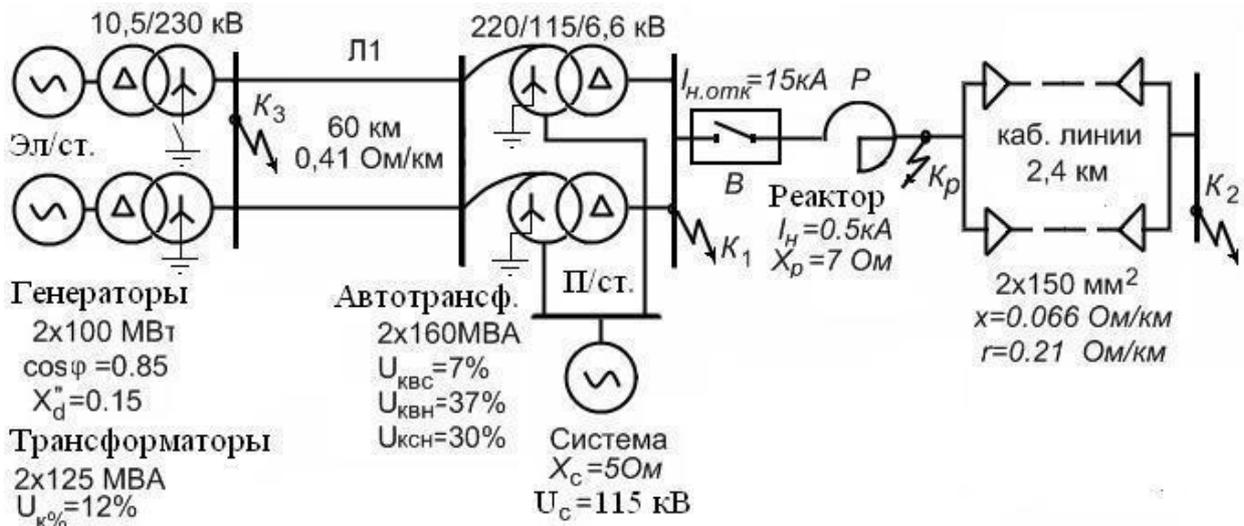


Рис. 1.1. Участок сети энергосистемы

Таблица 3. Данные по второй цифре варианта.

2-я цифра варианта	Напряжение, кВ		Сопротивление системы, Ом	Длина воздушной линии, км	$\tilde{\sigma}_{\delta\ddot{a}}$ Ом/км	Номинальное напряжение реактора, кВ
	Трансформаторы станции	Трансформаторы подстанции				
1	13,8/165	150/121/6,3	5	60	0,4	6
2	10,5/242	220/121/10,5	6	80	0,41	10
3	15,75/230	220/165/6,3	7	100	0,41	6
4	10,5/340	330/242/10,5	8	120	0,32	10

Таблица 4. Данные по третьей цифре варианта

3-я цифра варианта	Номинальный ток отключения выключателя, кА	Номинальный ток реактора, кА	Кабели			
			Число и сечение кабелей	$r_{\delta\ddot{a}}$ Ом/км	$\tilde{\sigma}_{\delta\ddot{a}}$ Ом/км	Длина кабельной линии, км
1	10	0,6	2x150	0,206	0,074	2,0
2	15	0,4	1x185	0,167	0,073	2,5
3	20	0,3	2x120	0,258	0,076	1,5
4	15	0,5	3x95	0,326	0,078	3,0

Важно приучить себя нумеровать сопротивления в виде дроби. В числителе - номер сопротивления, в знаменателе - величина вычисляемого сопротивления. В нумерации сопротивлений никаких индексов, кроме цифровых, не применять. Нумеровать сопротивления надо от начала до конца задачи, по нарастающей. Все это исключит ошибки при расчете сложных схем.

При составлении схемы замещения и определении сопротивлений трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов с третичной обмоткой следует пользоваться лекциями по дисциплине.

2. Производится расчет в именованных единицах с точным приведением. Сопротивления элементов должны быть приведены к одной ступени, называемой основной. Обычно это ступень, где случилось КЗ. При определении сопротивлений с одновременным приведением пользуются формулами в таком виде:

для генератора

$$x_{\Sigma} = \frac{U_{\text{н}}^2}{100} (k_1 k_2 \dots k_n); \quad (1)$$

для трансформатора

$$x_{\Sigma} = \frac{U_{\text{н}}^2}{100} (k_1 k_2 \dots k_n); \quad (2)$$

для ЛЭП

$$x_{\Sigma} = \frac{l}{n} (k_1 k_2 \dots k_n); \quad (3)$$

для реактора

$$x_{\Sigma} = \frac{U_{\text{н}}^2}{100} (k_1 k_2 \dots k_n). \quad (4)$$

В этих формулах:

$n$  - признак номинального параметра;

$n$  - количество параллельно соединенных элементов,

$k_1, k_2, \dots, k_n$  - коэффициенты трансформации трансформаторов между основной ступенью и приводимым элементом, составленные по правилу [7] и записанные в виде отношения напряжений:

$U$  - (напряжение обмотки обращенной к основной ступени)

$U$  - (напряжение обмотки, обращенной к приводимому элементу)

ЭДС системы принять равной среднему номинальному напряжению по соответствующей шкале [7], а ЭДС станции вычислить по формуле предполагая, что генератор был нагружен на номинальную нагрузку, а напряжение на его выводах равно среднему номинальному. В формулу следует подставлять приведенные величины.

Сворачиванием схемы относительно точки  $K_1$  получается эквивалентное сопротивление  $x_{\Sigma 1}$  и эквивалентная ЭДС. Сворачивание схемы производится по формулам параллельного и последовательных сложений [1,2,3]. При сворачивании схемы не следует учитывать сопротивления, по которым не протекает ток. По закону Ома вычисляется ток КЗ в точке  $K_1$ .

Прежде чем определять ТКЗ в точке  $K_2$ , необходимо определить сопротивление реактора  $P$  по отключающей способности выключателя  $B$ . Делается это из следующего соображения. При КЗ за реактором (в точке  $K_p$ ) ток КЗ не должен превышать номинального тока отключения выключателя  $I_{\text{отд}}$ . Тогда сопротивление реактора по закону Ома

$$x = \frac{E}{\sqrt{3} I_{дог}} \quad (5)$$

По номинальному напряжению и току из справочной литературы [6], например, подбирается реактор с ближайшим большим сопротивлением. Если в справочной литературе даются номинальные реактивности реакторов, например, [5, с. 230—245], то сопротивление из (5) следует перевести в относительно-номинальные единицы, выразить в процентах:

$$x_{\delta\%} = x \frac{\sqrt{3} I_i}{U} \cdot 100 \quad (6)$$

Полученную величину округлить до ближайшей большей по шкале  $\tilde{\sigma}_{\delta\%}$  и вычислить сопротивление реактора в Омах:

$$x_q = \frac{x_{p\%}}{100} \frac{U_i}{\sqrt{3} I_i} \quad (7)$$

где  $q$  - номер сопротивления реактора в схеме замещения.

Выбранное сопротивление реактора используется в последующих расчетах в качестве исходного, т. е. проведенный расчет повторять не следует.

Ток короткого замыкания в  $K_2$ , следует вычислять через полное сопротивление с учетом активного сопротивления кабеля.

3. Производится расчет в относительных единицах с точным приведением. Перед началом расчета задаются базисными величинами  $S_a = 1000$  или  $100$  МВА. Базисное напряжение на одной из ступеней принимается равным номинальному напряжению трансформатора, остальные вычисляются в соответствии с коэффициентами трансформации трансформаторов [1, 2, 3 или 7]. Определяются базисные токи. Сопротивления элементов вычисляются по формулам:

для генератора

$$x = \frac{S_a \tilde{\sigma}_g}{n_i P U_a} \quad (8)$$

для трансформатора

$$x = \frac{U_{k\%} S_a}{100 n_i U_a^2} \quad (9)$$

для ЛЭП

$$x = \frac{x_{нд} S_a}{n U_a^2} \quad (10)$$

для системы

$$x = \tilde{\sigma}_n \frac{S_a}{U_a^2} \quad (11)$$

для реактора

$$x = \frac{x_{\text{р\%}} I_a U_i}{100 \Phi U_a} \text{ или } x = \tilde{\omega} \frac{S_a}{U_a^2}. \quad (12)$$

Следует помнить, что в этих формулах  $U_i \approx U_a$ .

Дальнейший порядок расчета такой же, как и в предыдущем методе. Не следует лишь забывать пользоваться формулами для расчета в относительных единицах [1, 2, 3, 7].

Задача полезна тем, что позволяет проверить свою внимательность и заставляет не делать ошибок. Во избежание последних обязательно проводить проверку после каждых двух-трех действий. Для удобства проверки и наглядности расчеты сводятся в

табл. 5. Вычисляются отношения  $\frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_{*a}}$  для каждого элемента. Если все отношения одинаковы - ошибок в расчете нет. Если для какого-то элемента отношение существенно отличается от других - надо расчет временно прекратить, найти допущенную ошибку и лишь после этого продолжить расчет. Токи, полученные в результате обоих расчетов, должны совпадать.

Таблица 5. Проверка результатов расчетов.

Расчет	Единицы	$\overset{\circ}{A}$	$\tilde{\omega}_1$	$\tilde{\omega}_2$	$\tilde{\omega}_i$	$\tilde{\omega}_n$	$\tilde{\omega}_{k1}$	$I_{k1},$ кА	$\tilde{\omega}_{n+1}$	$\tilde{\omega}_{n+2}$	$r_{n+2}$	$z_{k2}$	$I_{k2},$ кА
точный	имен.												
	отн.												
	$\tilde{\omega} / \tilde{\omega}_{*a}$							погр.					погр.
прибли- женный	имен.												
	отн.												
	$\tilde{\omega} / \tilde{\omega}_{*a}$							погр.					погр.

4. Производится расчет в именованных единицах с приближенным приведением. Отличие от первого расчета состоит в том, что действительные коэффициенты трансформации трансформаторов заменяются на отношения средних номинальных напряжений [1, 2, 3, 7]. В формулах (1) и (2) исчезают коэффициенты трансформации. Приведение осуществляется подстановкой вместо  $U_i$  среднего номинального напряжения основной ступени. В формулах (3) и (4) пересчет производится отношением средних номинальных напряжений [1, 7]. Приведенная ЭДС источников принимается равной среднему номинальному напряжению основной ступени.

5. Производится расчет в относительных единицах с приближенным приведением. В этом расчете базисные напряжения не вычисляются, а принимаются равными средним номинальным напряжениям ступеней. Формулы (8) и (9) упрощаются, в них исчезает отношение напряжений. ЭДС в относительных единицах принимается равной 1. Во время расчета производится контроль его правильности с помощью табл. 4, как при точном приведении. Результаты (токи) должны совпасть.

Расхождение в результатах точного и приближенного приведений может достигать 10% и даже больше.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕРХПЕРЕХОДНОГО И УДАРНОГО ТОКОВ КЗ

Для схемы рис 2.1 определить сверхпереходный и ударный токи КЗ в точке  $K_1$ , с учетом подпитки от синхронного компенсатора (СК), нагрузки и асинхронного двигателя (АД), то же в точке  $K_p$  - без учета нагрузки. Построить осциллограммы токов КЗ от синхронного компенсатора, нагрузки и питающей сети для первых 3 — 6 периодов. Использовать примеры 1.2, 1.3 и 4.1 из учебного пособия [7].

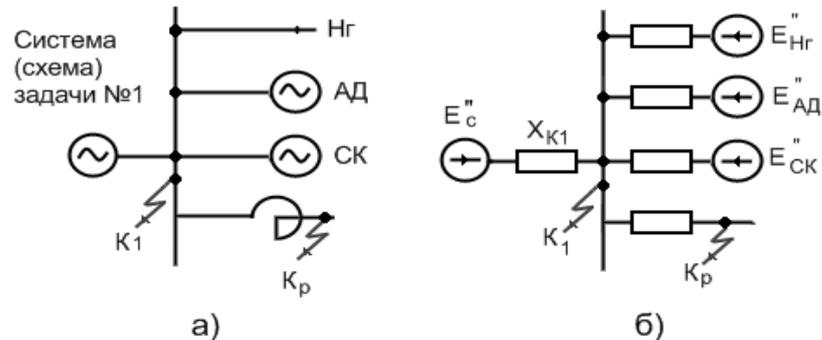


Рис.2.1. Упрощенная схема (а) и схема замещения (б).

Синхронный компенсатор, нагрузку и асинхронный двигатель подключить к шинам низшего напряжения подстанции схемы задачи 1 так, как показано на рис. 2,а. Параметры дополнений к схеме взять из табл. 6.

Таблица 6. Исходные данные.

1-я цифра варианта	Нагрузка, МВА	2-я цифра варианта	Синхронный компенсатор				3-я цифра варианта	Асинхронный двигатель		
			$U_i$ , кВ	$Q_i$ , МВАр	$x_d''$ , *н	$T_a$ , сек		$P_i$ , кВт	$\hat{E}_{i \text{ оñê}}$	$k_y$
1	15	1	6,6	10	0,25	0,15	1	3200	6,2	1,7
2	20	2	11	15	0,27	0,18	2	3500	6,8	1,73
3	30	3	6,6	30	0,29	0,21	3	4000	6,0	1,76
4	40	4	11	37,5	0,31	0,24	4	6300	5,5	1,8

Обобщенная нагрузка, асинхронный двигатель, так же как и синхронная машина в первый момент КЗ являются источниками тока короткого замыкания, поэтому в схему замещения вносятся своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями как показано на рис. 2.1,б. Короткое замыкание в точке  $K_1$  разделяет все источники. Поэтому расчет для каждой цепи следует производить отдельно, причем удобно расчеты вести в относительно-номинальных единицах каждого источника. Ток от питающей сети взять из задачи раздела 1. (из точного расчета в относительных единицах).

Сверхпереходные ЭДС вычисляются по формулам:

для синхронного компенсатора

$$E_{*i}'' = \frac{U_{\bar{n}\bar{d}.i}}{U_i} + I_{*i} \bar{\delta}_d'' ; \quad (13)$$

для асинхронного двигателя

$$E_{*i}'' = \frac{U_{\tilde{n}\delta.i}}{U_i} + I_{*i}'' \tilde{\delta}_{AA}'' \sin \varphi_i ; \quad (14)$$

для обобщенной нагрузки

$$E_{*i}'' = 0,85.$$

При этом считать, что СК и АД имели нагрузку

$$I_{*i}'' = 0,7-0,9 ,$$

при этом для АД  $\tilde{n}\cos\varphi_i = 0,8$ ,  $U_i = 6$  или  $10$  кВ.

Сверхпереходное сопротивление для АД определяется по формуле

$$\tilde{\delta}_{AA}'' = 1/\hat{E}_{i\delta\tilde{n}},$$

а для обобщенной нагрузки - принимается  $\tilde{\delta}_{*i}'' = 0,35$  [1].

Токи КЗ от этих источников определяются по общей формуле

$$I'' = \frac{E_{*i}''}{x_{*i}''} \frac{S_i}{\sqrt{3}U_i} . \quad (15)$$

Суммированием этих токов с током питающей сети получается общий ток КЗ.

Ударные токи от нагрузки, АД и СК для точки  $K_I$ , определяются без вычисления

отношения  $\tilde{\delta}/r$ . Для нагрузки  $k_y = 1$ [1]. Для СК  $k_y$  определяется по значению  $T_a^{(3)}$  с учетом формулы (16).

Определение ударного тока от питающей сети производится в следующем порядке. Составляется схема замещения сети для активных сопротивлений (так же, как и для индуктивных в задаче раздела 1), определяются ее параметры, схема сворачивается к точке  $K_I$ , т. е. определяется эквивалентное сопротивление  $r_{K1}$ . По отношению  $x_{K1}/r_{K1}$  определяется ударный коэффициент [1, 7].

Активные сопротивления элементов схемы определяются по следующим формулам. Для генераторов и синхронного компенсатора активное сопротивление

$$r = \frac{x_2}{wT_a^{(3)}} \approx \frac{x_d''}{wT_a^{(3)}} , \quad (16)$$

где  $x_2$  - сопротивление обратной последовательности генератора;

$T_a^{(3)}$  - постоянная времени синхронного генератора или синхронного компенсатора. Формулой можно пользоваться в любых единицах.

Для трансформаторов точная величина активного сопротивления может быть определена по потерям короткого замыкания:

$$r_{*i} = \frac{P_{\delta c}}{S_i} \quad (17)$$

и пересчитана при необходимости в именованные или относительные единицы. В приближенных расчетах можно воспользоваться кривыми для отношений  $\tilde{\delta}/r$  [1, с. 504] и активное сопротивление определить по формуле

$$r = \frac{x}{(x/r)} \quad (18)$$

Формула справедлива в любых единицах.

Активное сопротивление ЛЭП определяется по справочной литературе в зависимости от сечения [5,6]. В данной учебной задаче сечениями ЛЭП следует задаться. Для линий 110 кВ - 70мм<sup>2</sup>; 150 кВ -120 мм<sup>2</sup>; 220 кВ-240 мм<sup>2</sup>; 330 кВ-600 мм<sup>2</sup>

..

Если отсутствуют справочные материалы, то активное сопротивление проводника можно вычислить по формуле

$$r = l / \gamma S \quad (19)$$

В этой формуле длину ЛЭП  $l$  следует подставлять в метрах, сечение  $S$  - в мм<sup>2</sup>,  $\gamma = 32$  м/Ом-мм<sup>3</sup> для алюминиевых проводов. Сопротивление получается в Омах. При необходимости оно пересчитывается в относительные единицы.

Активное сопротивление реактора определяется так же, как для трансформаторов через  $\Delta P_i$ , или при учебном проектировании отношение  $(x/r) = 30$ . Для системы принять  $(x/r) = 10$ .

Упрощение схемы замещения для активных сопротивлений производится так же, как для индуктивных.

Ударный ток от каждого источника определяется по формуле

$$i_y = \sqrt{2} k_y I'' \quad (20)$$

Полный ударный ток получается суммированием токов всех источников.

При расчете в точке  $K_p$  нагрузку и АД не учитывать. Сопротивление СК привести к относительно-базисным условиям и найти результирующие сопротивления  $\tilde{r}_{\partial\partial}$  и  $r_{\partial\partial}$ . Все источники объединить в один эквивалентный. Эквивалентную ЭДС принять равной  $E_{*a} = 1$ . Определить периодический ток КЗ, остаточное напряжение на шинах как падение напряжения на реакторе, ударный ток.

Построить осциллограммы токов питающей сети, СК и нагрузки при КЗ в точке  $K_l$ . Считать, что периодические составляющие от СК и сети не затухают, а обе составляющие тока нагрузки затухают в 2 раза за 0,01 с. Для построения апериодической составляющей удобно составить такую таблицу 7, основанную на свойстве экспоненты.

Таблица 7. Апериодический ток.

$t$	.	0,01	0,02	0,03	0,04	...	...	$0,01 \times n$
$i_{a*}$	1	$k_y - 1$	$(k_y - 1)^2$	$(k_y - 1)^3$	$(k_y - 1)^4$	...	...	$(k_y - 1)^n$

Письменно ответить на следующие вопросы:

- 1.Что такое ударный ток и ударный коэффициент?
- 2.Почему в токе КЗ возникает апериодическая составляющая?
- 3.Почему при КЗ на зажимах АД последний создает ток как генератор? Почему этот ток затухает до нуля?

### 3. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТОКА КЗ

Построение кривых изменения действующего значения периодической составляющей тока в зависимости от времени по расчетным кривым. Использовать пример 5.1 [7].

Для схемы рис. 3.1 произвести расчет тока станции при КЗ в точках  $K_1$  и  $K_3$  по методу расчетных кривых. Определить остаточное напряжение на шинах станции. Построить изменение токов и напряжений во времени.

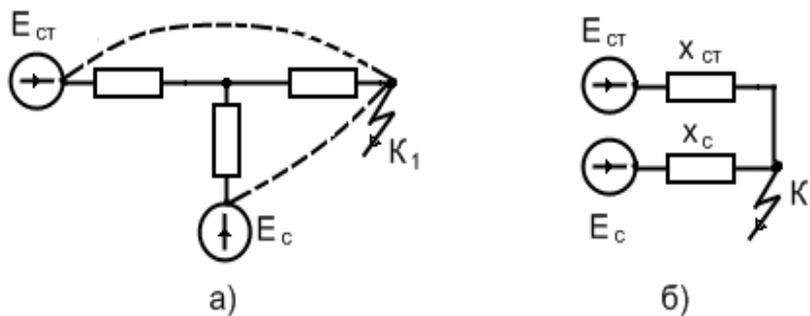


Рис. 3.1. Схема замещения к задаче 3

Объяснить и сравнить результаты в ответах на контрольные вопросы.

В качестве исходной схемы следует взять из задачи 1 схему промежуточных преобразований вида, изображенного на рис. 3.1,а. Трехлучевую звезду следует преобразовать в треугольник и вычислить взаимное сопротивление между станцией и точкой КЗ  $\tilde{\sigma}_{\bar{n}\bar{o}}$ .

Требуется вычислять ток только от станции, поэтому сопротивление от системы вычислять не обязательно.

Исходные сопротивления берутся из задачи раздела 1 (из приближенных методов). Полученное сопротивление  $\tilde{\sigma}_{c\bar{o}}$  пересчитывается в относительно-номинальные единицы  $\tilde{\sigma}_{\bar{o}\bar{a}\bar{n}\bar{i}}$ . Если  $\tilde{\sigma}_{c\bar{o}}$  в Омах, то

$$x_{\bar{o}\bar{a}\bar{n}\bar{i}} = \tilde{\sigma}_{\bar{n}\bar{o}} \frac{S_{i\Sigma}}{U_{\bar{n}\bar{o}.i}^2}. \quad (21)$$

Здесь  $S_{i\Sigma} = \frac{nP_i}{\cos\varphi_i}$  - суммарная полная мощность станции;  $U_{\bar{n}\bar{o}.i}$  - среднее

номинальное напряжение той ступени, к которой приведено сопротивление  $\tilde{\sigma}_{c\bar{o}}$ . Если  $\tilde{\sigma}_{c\bar{o}}$  в относительных единицах, то

$$x_{\bar{o}\bar{a}\bar{n}\bar{i}} = \tilde{\sigma}_{\bar{n}\bar{o}} \frac{S_{i\Sigma}}{S_a}. \quad (22)$$

Зная  $\tilde{\sigma}_{\delta\tilde{a}\tilde{n}\div}$  и тип станции, по расчетным кривым [1, с. 245, 247] определяются токи для всех заданных на кривых моментов времени, заносятся в табл. 8 и переводятся в кА по формуле

$$I = I_{i\Sigma} I_{*i} . \quad (23)$$

При вычислении номинального суммарного тока станции следует брать среднее номинальное напряжение ступени, где произошло КЗ.

Таблица 8.Изменение токов и напряжений в зависимости от времени.

Время, с		0	0,1	0,2	0,5	1	2	4	$\infty$
Точка $K_1$	$I_{*i}$								
	$I$ , кА								
	$U_{\tilde{a}*i}$								
Точка $K_3$	$I_{*i}$								
	$I$ , кА								
	$U_{\tilde{a}*i}$								

Для определения напряжения на шинах генератора определяется внешнее сопротивление цепи КЗ в относительно-номинальных единицах

$$x_e = \tilde{\sigma}_{\delta\tilde{a}\tilde{n}\div} \ddot{\sigma}_d , \quad (24)$$

падение напряжения на котором дает напряжение на выводах генератора

$$U_{\tilde{a}*i} = I_{*i} x_e . \quad (25)$$

Повторить расчет для точки  $K_3$ . Построить изменение действующих значений токов во времени в относительных единицах на одном графике для разных точек. На другом - изменение напряжений на выводах генератора в относительных единицах.

Ответить письменно на следующие вопросы:

1. Почему ток КЗ в точке  $K_1$  в кА больше, чем в точке  $K_3$ ?
2. Почему в относительных единицах ток КЗ в точке  $K_3$  больше, чем в  $K_1$ ?
3. Объясните изменение тока во времени. Почему в первый момент он резко возрос? Почему в течение времени от 0 до —0,5 с уменьшается, а потом увеличивается?
4. Почему ток в точке  $K_3$  затухает больше и быстрее тока КЗ в точке  $K_1$ ?

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КЗ

Определение сверхпереходных токов всех видов несимметричных коротких замыканий.

Для схемы рис. 1.1 произвести расчет сверхпереходных токов трехфазного, двухфазного, однофазного и двухфазного КЗ на землю в точке  $K_3$ . Расчет произвести в относительных единицах с точным приведением сопротивлений. Рассчитанные величины сопротивлений взять из задачи раздела 1. Использовать примеры 2.1 и 2.2 [7].

Порядок определения тока несимметричного КЗ состоит в следующем. Составляются схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей [1, 7]. Особое внимание необходимо уделить составлению схемы замещения нулевой последовательности. Перед составлением схемы следует выяснить все пути протекания тока нулевой последовательности [1, 7]. Для этого необходимо знать схемы замещения трансформаторов для токов нулевой последовательности [1, 7].

При составлении схемы замещения нулевой последовательности надо учитывать режимы нейтралей трансформаторов. Если нейтраль обмотки трансформатора разземлена, ток нулевой последовательности в ней отсутствует. В схему вносятся все элементы, по которым протекает ток нулевой последовательности. Последовательно с обмотками трансформаторов, нейтрали которых разземлены, изображается разрыв (отключенный ключ). Схемы прямой и обратной последовательностей по конфигурации одинаковы, схема нулевой последовательности может существенно отличаться от них. В схеме нулевой последовательности нельзя объединять параллельно включенные трансформаторы, если нейтраль одного заземлена, а у другого - разземлена.

При определении сопротивлений схем обратной и нулевой последовательностей следует помнить, что при точном расчете сопротивление генератора обратной последовательности больше сверхпереходного, а сопротивление нулевой последовательности ЛЭП существенно больше сопротивления прямой последовательности. Поэтому сопротивления ЛЭП необходимо увеличить в  $x_0/x_1$  раз в соответствии с [1, 7]. Сопротивления обратной, нулевой и прямой последовательностей системы принять одинаковыми.

Составленные схемы замещения сворачиваются и определяются их эквивалентные сопротивления. Составляются комплексные схемы замещения, из которых определяется ток прямой последовательности

$$I_1^{(n)} = \frac{E_Y}{x_{\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}}, \quad (26)$$

а по формуле

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_1^{(n)} \quad (27)$$

определяется ток короткого замыкания. При необходимости из комплексной схемы можно определить напряжение прямой последовательности в месте повреждения:

$$U_{k1}^{(n)} = x_{\Delta}^{(n)} I_1^{(n)}. \quad (28)$$

Комплексные схемы замещения, величины  $x_{\Delta}^{(n)}$  и  $m^{(n)}$  для разных видов КЗ приводятся в табл. 8. В конце расчета ток переводится в кА.

Таблица 9. Комплексные схемы замещения.

Вид КЗ	Комплексная схема замещения	$\tilde{O}_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
$\hat{E}^{(3)}$		0	1
$\hat{E}^{(2)}$		$\tilde{O}_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
$\hat{E}^{(1)}$		$\tilde{O}_{2\Sigma} + \tilde{O}_{0\Sigma}$	3
$\hat{E}^{(1,1)}$		$\frac{\tilde{O}_{2\Sigma} \cdot \tilde{O}_{0\Sigma}}{\tilde{O}_{2\Sigma} + \tilde{O}_{0\Sigma}}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{\tilde{Q}_{\Sigma} \cdot \tilde{Q}_{\Sigma}}{\tilde{Q}_{\Sigma} + \tilde{Q}_{\Sigma}}}$

Письменно ответить на следующие контрольные вопросы:

- Сравните по величине токи прямой последовательности всех видов КЗ, расположите их в порядке убывания. Объясните причину этого убывания.
- Сравните по величине токи короткого замыкания, расположите их в порядке убывания. Объясните, почему этот порядок не совпадает с порядком убывания токов прямой последовательности?
- Объясните, почему ток однофазного КЗ больше (меньше) трехфазного?
- Определите отношение токов двух- и трехфазного КЗ.

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КЗ В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ СЕТИ.

Распределение токов и напряжений всех последовательностей по схеме и определение фазных величин токов и напряжений в любой точке сети.

Для схемы рис. 5.1 определить построением векторных диаграмм токи и напряжения в точках  $K1, 2, 3, 4$  при двухфазном, однофазном и двухфазном КЗ на землю в точке К. Расчет произвести в относительно-номинальных, единицах. Соотношения между мощностями генераторов и трансформаторов заданы на схеме.

Величины  $\tilde{\sigma}_d''$ ,  $U_{k\%}$  и  $n$  даны в табл. 10.

Таблица 10. Исходные данные

1-я цифра варианта	$x_d''$ генератора, Ом	2-я цифра варианта	$U_{k\%}$ трансформатора	3-я цифра варианта	Соотношение мощностей $n$
1	0,12	1	10,5	1	2
2	0,16	2	11	2	3
3	0,20	3	12	3	0,5
4	0,24	4	13	4	0,25

Напряжения короткого замыкания трехобмоточных трансформаторов даны на схеме.

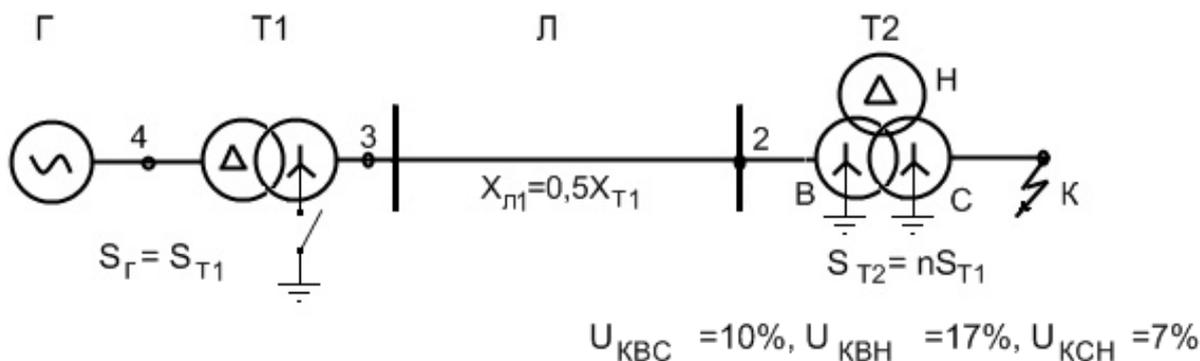


Рис. 5.1. Схема сети.

### Порядок решения задачи:

1. Составляются схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. В первых двух можно делать упрощения объединением параллельных элементов. При составлении схемы замещения нулевой последовательности упрощений делать нельзя. Необходимо учитывать режимы нейтралей (как в разделе 4). На всех схемах замещения расставить заданные точки 1, 2, 3, 4.

2. Определяются сопротивления элементов в относительно-номинальных единицах. В качестве базисной рекомендуется принять мощность генератора. Тогда сопротивления генератора и трансформатора численно равны  $\tilde{\sigma}_d''$  и  $U_{k\%}$  соответственно. Если в схемах прямой и обратной последовательностей объединены параллельные элементы, то приведенные величины надо уменьшить в 2 раза.

Сопrotивление прямой последовательности ЛЭП определить, как задано на схеме. Сопrotивление второго трансформатора определяется по формуле

$$x_{\dot{0}2} = \frac{U_{k\% \dot{0}2}}{100} \frac{S_{T1}}{S_{T2}} = \frac{U_{k\% \dot{0}2}}{n100} \quad (29)$$

Следует помнить, что в схеме нулевой последовательности сопротивление ЛЭП надо увеличить в  $x_0 / x_1$  раз (как в разделе 4).

3. Определяются эквивалентные сопротивления всех схем  $x_{1\Sigma}, x_{2\Sigma}, x_{0\Sigma}$ . Принять

$$x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma}.$$

Дальнейший расчет, начиная с 4 по 7п., следует повторить три раза: для двухфазного, однофазного и двухфазного КЗ на землю.

4. Определить ток и напряжение прямой последовательности в месте КЗ по формулам (26) и (28). ЭДС генераторов  $E = 1$ .

5. Определить токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей в точке КЗ. Для этого следует воспользоваться соответствующими соотношениями [1, 7].

6. Распределить токи и напряжения по схеме, т. е. определить их в заданных точках 1, 2, 3, 4. При этом следует четко уяснить, что токи и напряжения прямой последовательности распределяются по схеме прямой последовательности, токи и напряжения обратной последовательности—по схеме обратной последовательности, токи и напряжения нулевой последовательности - по схеме нулевой последовательности. При определении симметричных составляющих в заданных точках пользуются законами Кирхгофа. Известными в каждой схеме являются ток и напряжение в месте КЗ, а в схеме прямой последовательности — еще ЭДС генераторов  $E = 1$ .

Для контроля правильности вычисления следует помнить, что в схеме прямо последовательности потенциал убывает от 1 в генераторе до наименьшего  $U_{k1}$  в месте КЗ. В схемах же обратной и нулевой последовательностей наибольший потенциал существует в месте КЗ и убывает до нуля по мере приближения к нейтралю источников [1, 7]. При распределении токов и напряжений удобно вести расчеты по модулю, т. е. не обращать внимания на знаки минус в формулах, перечисленных в п. 5. Это упрощает расчеты. Рекомендуется применять следующую индексацию при симметричных составляющих:

$U_{k1}, U_{k2}, U_{k0}, I_{k1}, I_{k2}, I_{k0}$  - напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте КЗ;

$U_{1(3)}, U_{2(3)}, U_{0(3)}, I_{1(3)}, I_{2(3)}, I_{0(3)}$  - напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке 3 т.д.

7. Фазные величины токов и напряжений в каждой точке - складываются из составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей. Наиболее наглядным способом определения фазных величин является построение векторных диаграмм, что и следует сделать в данной задаче.

Построение диаграмм следует начать с точки короткого замыкания. Векторные диаграммы для точки КЗ представлены в [1, 7]. Векторные диаграммы в других точках, за исключением точки 4, будут отличаться величинами симметричных составляющих. При построении векторной диаграммы токов в точке 3 следует помнить, что ток нулевой последовательности в ней отсутствует, т. к. нейтраль трансформатора разземлена.

Точка 4 находится за трансформатором со схемой соединения  $Y/\Delta -11$ , поэтому векторы токов и напряжений при переходе через него изменяют фазу на  $30^\circ$  [1,7]. Токи и напряжения прямой последовательности поворачиваются против часовой стрелки, обратной - по часовой стрелке.

За образец построения диаграммы можно взять диаграммы [1, 7]. Удобно диаграммы токов и напряжений строить отдельно, не совмещая. Диаграммы следует строить в масштабе. Из диаграммы определяются фазные величины токов и напряжений и заносятся в таблицу результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия, 1970, с. 519.
2. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия, 1964, с. 732.
3. Дроздов А. Д. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Новочеркасск: НПИ. 1976, с. 79.
4. Дроздов А. Д. Несимметричные переходные режимы в электрических системах и цепях релейной защиты. Новочеркасск: НПИ, 1977, с. 75.
5. Крючков И. П. и др. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. М.: Энергия, 1972, с. 336.
6. Крючков И. П. и др. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. М.: Энергия, 1978. с. 380.
7. Н.И. Цыгулев, Шелест В.А., Хлебников В.К. Основы электромагнитных переходных процессов в электрических системах. Учебное пособие. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017, с. 98.