

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Нижневартовский государственный гуманитарный университет

А.Д. Эрнст

**РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Учебное пособие



**Издательство
Нижневартовского государственного
гуманитарного университета
2012**

УДК 621.3.064.1(075)
Э 81

Печатается по решению Редакционно-издательского совета
Нижневартовского государственного гуманитарного университета

Эрнст А.Д.

Э 81 Расчет токов короткого замыкания в электрических системах: Учеб. пособие. — Нижневартовск: Изд-во НГГУ, 2012. — 86 с.

Изложены основные положения расчетов токов короткого замыкания в электрических системах напряжением выше 1000 В. Рассмотрены вопросы составления и преобразования схем замещения и применения практических методов расчета симметричных и несимметричных коротких замыканий в дисциплине «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах». Приведены задания, исходные данные и примеры выполнения курсового проекта и домашнего задания.

Предназначено для самостоятельной работы студентов дистанционной, очной и заочной форм обучения по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», а также для расчетов токов короткого замыкания при курсовом проектировании и выполнении выпускной квалификационной работы.

УДК 621.3.064.1(075)

© Эрнст А.Д., 2012
© Издательство НГГУ, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Переходные процессы в электроэнергетических системах». Расчет режимов коротких замыканий (КЗ) в электроустановках напряжением выше 1000 В производится для выбора схем электрических соединений, выбора и проверки оборудования и проводников, расчетов релейной защиты и других целей [1]. Основной целью данного пособия для студентов дистанционной, очной и заочной форм обучения направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника» является закрепление изучаемого теоретического материала и приобретение навыков практического решения инженерных задач расчета режимов симметричных и несимметричных коротких замыканий. Расчет режимов коротких замыканий производится аналитическим расчетом начального момента КЗ и практическими методами для произвольного момента времени.

Предлагаемое пособие включает в себя домашнее задание — расчет значения периодической составляющей тока при трехфазном КЗ в заданной точке тремя методами (методом типовых кривых, методом расчетных кривых, методом спрямленных характеристик) с примером расчета, а также задание, методические указания и пример расчета курсовой работы по курсу «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах».

В данном учебном пособии подробно рассматриваются численные примеры для расчета курсового проекта и домашнего задания. Пособие выполнено в соответствии с действующими нормативными документами и может быть использовано при курсовом, дипломном и промышленном проектировании электрических станций, подстанций и промышленных предприятий.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАСЧЕТОВ

Домашнее задание требует расчета значений периодической составляющей тока КЗ при трехфазном КЗ в заданной точке для начального момента времени и времени $t = 0,5$ с тремя методами (метод типовых кривых, метод расчетных кривых, метод спрямленных характеристик [2—5]). Также требуется оценить погрешность расчетов. Текст домашнего задания приведен в приложении А. Объем домашнего задания — 10—12 страниц.

Курсовая работа представляет собой комплексное задание, включающее в себя вопросы расчета симметричных и несимметричных режимов КЗ. При выполнении должны быть определены следующие расчетные величины ее:

- долевое участие каждой электрической станции и системы в общем токе трехфазного КЗ в начальный момент времени при трехфазном КЗ в заданной точке;
- начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ от каждого источника и суммарный ток трехфазного КЗ;
- значение тока КЗ для времени $t = 0,1$ с и $t = 3$ с;
- остаточные напряжения в заданных точках системы;
- ударный ток КЗ;
- действующее значение тока КЗ за первый период его изменения и тепловой импульс;
- мощность КЗ;
- начальное значение токов отдельных последовательностей и полного тока при заданном виде несимметричного КЗ;
- напряжения отдельных последовательностей в месте КЗ и в произвольной точке системы при несимметричном КЗ, а также полные напряжения.

Кроме этого, необходимо построить векторные диаграммы токов и напряжений в месте КЗ и остаточных напряжений в заданных точках системы при несимметричном КЗ. Текст задания к курсовой работе приведен в приложении Б. Объем курсовой работы — 25—30 страниц.

Курсовая работа выполняется в соответствии с требованиями к текстовым документам [6] и защищается после устранения замечаний, сделанных преподавателем при проверке законченной

работы. При защите студент должен уметь ответить на вопросы, приведенные в приложении В.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Домашнее задание и курсовой проект выполняются в соответствии с индивидуальным заданием, выдаваемым каждому студенту. Бланки заданий приведены в приложении А и приложении Б. Исходные данные берутся в соответствии с шифром, состоящим из комбинации буквенных и цифровых обозначений.

Для домашнего задания, например:

1.2.K5.

Первая цифра (1) обозначает номер схемы (в нашем случае первая схема).

Вторая цифра (2) определяет параметры генераторов, трансформаторов, реакторов, нагрузок станции. Цифра указывает вариант в таблице 2.3.

Сочетание буквы и цифры (K5) указывает номер точки, в которой производится расчет трехфазного короткого замыкания.

Для курсовой работы, например:

1.3.2.5.K4 (1.1)

Первая цифра (1) обозначает номер схемы (в нашем случае первая схема).

Вторая цифра (3) обозначает вариант в таблице 2.1 и определяет характеристики линий электропередачи.

Третья цифра (2) указывает состояние нейтралей трансформаторов, определяемое вариантом таблицы 2.2.

Четвертая цифра (5) определяет параметры генераторов, трансформаторов, автотрансформаторов, реакторов, нагрузок и системы. Цифра указывает вариант в таблице 2.3.

Сочетание буквы и цифры (K4) указывает номер точки, в которой производится расчет короткого замыкания.

Цифры в скобках указывают вид короткого замыкания:

- (1) — однофазное КЗ;
- (2) — двухфазное КЗ;
- (1.1) — двухфазное КЗ на землю.

Задание предусматривает расчет симметричного и несимметричного КЗ в одной точке заданной схемы.

Исходные данные для расчетов приведены ниже. При расчетах считать, что все генераторы снабжены демпферными обмотками и устройствами АРВ, схемы заземления нейтралей в блочных схемах одинаковы для всех блоков данной станции.

При определении ударного коэффициента активное сопротивление системы принимать равным нулю, а сопротивления нагрузки не учитывать. Точки короткого замыкания K6, K7, K8, K9 находятся посредине соответствующих линий.

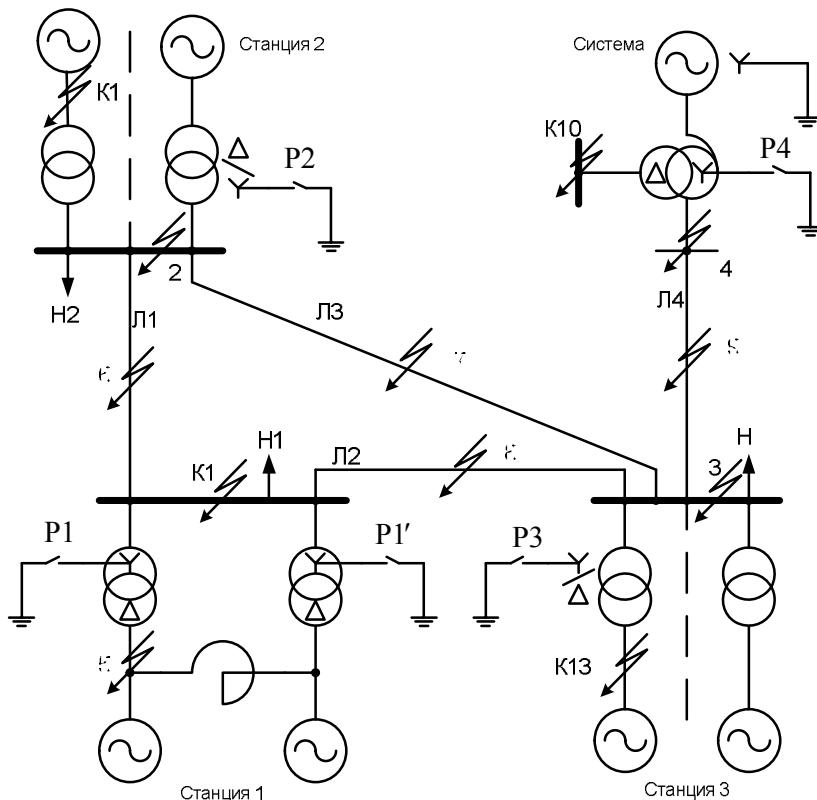


Рис. 2.1. Схема электрических соединений системы № 1

Таблица 2.1

Характеристики линий электропередачи

Вариант	Длина линий (км)				Удельные параметры (Ом/км)	
	Л1	Л2	Л3	Л4	$x_{y\delta l}$	$r_{y\delta}$
1	4	5	7	3	0,42	0,09
2	2	3	4	4	0,4	0,085
3	4	2	4,5	3	0,4	0,075
4	8	10	13	2	0,36	0,07
5	4	6	7	5	0,34	0,065
6	12	6	9	1	0,32	0,06
7	2	15	13	12	0,3	0,06
8	10	6	10	15	0,32	0,07
9	12	12	17	5	0,36	0,08
10	8	5	9	5	0,38	0,09

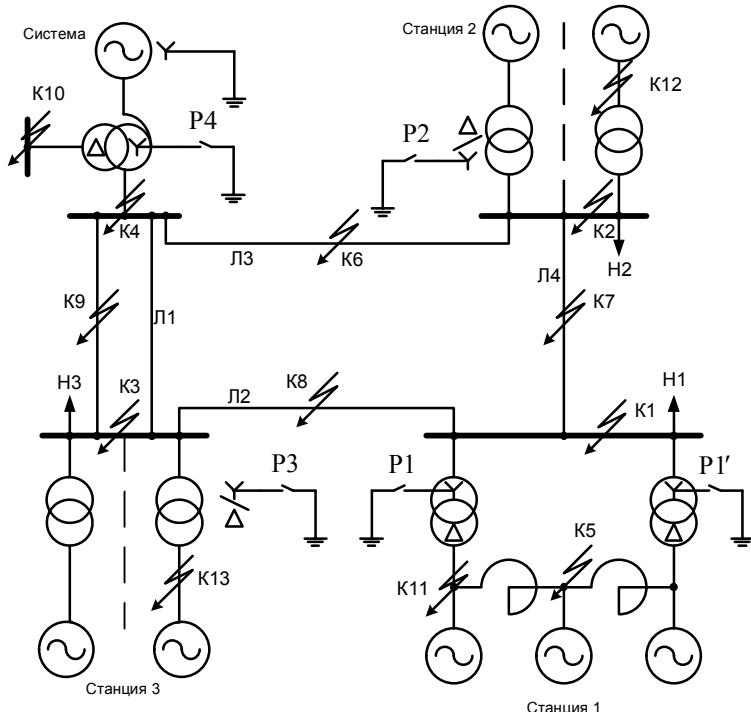


Рис. 2.2. Схема электрических соединений системы №2

Таблица 2.2

Состояние нейтралей трансформаторов

Вариант	P1	P1'	P2	P3	P4
1	X	X	X	X	X
2	X	X	X	—	X
3	X	X	—	—	X
4	X	—	X	—	X
5	—	—	X	X	X
6	—	X	X	—	X
7	X	—	—	X	X
8	—	X	—	X	X
9	X	—	—	—	X
10	—	—	—	X	X

Примечание: X — нейтраль заземлена.

Таблица 2.3

Технические данные элементов электрической системы

Вариант	Станция 1														
	Турбогенераторы с АРВ						Трансформаторы					Реакторы			
	P_h МВт	$\cos \phi_h$	U_h кВ	x_d''	x_2	$\frac{x}{r}$	S_h МВА	U_B кВ	U_H кВ	U_K %	$\frac{x}{r}$	U_h кВ	I_h кА	x_p Ом	$\frac{x_p}{r}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	30	0,8	6,3	0,143	0,174	20	40	115	6,3	10,5	20	6	2	0,14	40
2	60	0,8	10,5	0,146	0,18	40	80	121	10,5	10,5	20	10	2	0,2	40
3	100	0,85	10,5	0,183	0,223	100	125	121	10,5	10,5	30	10	3	0,25	50
4	120	0,85	10,5	0,214	0,26	100	125	121	10,5	10,5	30	10	3	0,35	50
5	200	0,85	15,75	0,19	0,232	120	200	121	15,7	10,5	30	15,75	2	0,4	40
6	120	0,85	10,5	0,214	0,26	100	125	121	10,5	10,5	30	10	3	0,14	50
7	100	0,85	10,5	0,183	0,223	100	125	242	10,5	11	30	10	4	0,2	80
8	60	0,8	6,3	0,146	0,18	40	80	242	6,3	11	20	6	4	0,25	80
9	30	0,8	10,5	0,143	0,174	20	32	330	10,5	11	20	10	2	0,35	40
10	63	0,8	10,5	0,2	0,25	40	80	121	10,5	10,5	20	10	2	0,4	40

Продолжение табл. 2.3

Вариант	Станция 2											
	Турбогенераторы с АРВ							Трансформаторы				
	n	P_H МВт	$\cos \phi_H$	U_H кВ	x_d''	x_2	$\frac{x}{r}$	S_H МВА	U_B кВ	U_H кВ	U_k %	
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	6	100	0,85	10,5	0,183	0,223	100	125	121	10,5	10,5	30
2	4	120	0,85	10,5	0,214	0,26	100	125	121	10,5	10,5	30
3	5	165	0,85	18	0,213	0,25	100	200	121	18	10,5	30
4	3	200	0,85	15,75	0,19	0,232	120	200	121	15,75	10,5	30
5	4	300	0,85	20	0,195	0,238	130	400	121	20	10,5	40
6	4	320	0,85	20	0,173	0,21	140	400	121	20	10,5	40
7	3	500	0,85	20	0,25	0,28	150	630	242	20	11	50
8	6	320	0,85	20	0,173	0,21	140	400	242	20	11	40
9	6	300	0,85	20	0,195	0,238	130	400	347	20	11	40
10	8	200	0,85	15,75	0,19	0,232	120	200	121	15,75	10,5	30

Продолжение табл. 2.3

Вариант	Станция 3											
	Турбогенераторы с АРВ							Трансформаторы				
	n	P_H МВт	$\cos \phi_H$	U_H кВ	x_d''	x_2	$\frac{x}{r}$	S_H МВА	U_B кВ	U_H кВ	U_k %	
	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	6	20	0,85	10,5	0,225	0,228	40	40	121	10,5	10,5	20
2	8	30	0,8	10,5	0,197	0,206	40	40	121	10,5	10,5	20
3	8	40	0,8	15,75	0,232	0,236	40	63	115	15,75	10,5	20
4	5	72	0,8	13,8	0,24	0,26	40	80	121	13,8	10,5	20
5	6	90	0,9	16,5	0,19	0,198	50	125	121	16,5	10,5	30
6	4	100	0,85	13,8	0,22	0,23	50	125	121	13,8	10,5	30
7	8	171	0,9	15,75	0,27	0,28	50	200	242	15,75	11	30
8	5	260	0,85	15,75	0,268	0,27	50	400	242	15,75	11	40
9	4	300	0,85	15,75	0,34	0,35	60	400	347	15,75	11	40
10	6	500	0,85	15,75	0,3	0,31	60	630	121	15,75	10,5	50

Окончание табл. 2.3

Вариант	Автотрансформатор								Система	Нагрузка		
	S_h МВА	U_B кВ	U_C кВ	U_H кВ	U_{kBH} %	U_{KCH} %	U_{kBC} %	$\frac{x}{r}$		S_{h1} МВА	S_{h2} МВА	S_{h3} МВА
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
1	63	230	121	11	35	22	11	20	1500	20,0	40,0	160,0
2	125	230	121	11	31	19	11	30	2000	100	200	200
3	200	230	121	11	32	20	11	30	2500	200	400	1000
4	250	230	121	11	32	20	11	30	2300	200	200	400
5	125	330	115	11	35	22	10	30	3500	800	1000	1000
6	200	330	121	11	32	22	10	30	4000	400	600	800
7	500	500	230	11	35	22	11	50	4500	1000	200	800
8	800	500	230	11	23	13	9	60	5000	200	2000	2000
9	500	500	330	11	67	61	9,5	50	∞	100	1000	1500
10	200	230	121	11	32	20	11	30	∞	200	2000	250

Примечания: n — количество блоков генератор-трансформатор;
 ∞ — система бесконечной мощности ($x_c = 0$).

3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ, СОСТАВЛЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

3.1. Общие положения

Для расчета токов КЗ необходимо составить схемы замещения, в которых магнитосвязанные цепи заменяются электрической связью путем приведения параметров элементов различных ступеней напряжения к одной ступени напряжения, принятой за основную. При использовании приведения в относительных единицах рекомендуется в качестве основной выбирать базисную ступень $U_{osn} = U_\delta$. При определении параметров учитывать только индуктивные сопротивления отдельных элементов. Если по какому-либо элементу ток при КЗ не протекает — он исключается из схемы замещения. Все сопротивления схем нумеруются

порядковыми номерами, которые записывают в числителе дроби. В знаменателе указывается величина сопротивления в относительных единицах при принятых базисных условиях S_δ , U_δ . Со противлениям, возникающим в результате преобразования, присваиваются последующие порядковые номера.

В соответствии с точностью практических методов расчета рекомендуется использовать приближенное приведение по средним коэффициентам трансформации. При этом для каждой ступени трансформации устанавливается одно среднее номинальное напряжение, а именно: 515; 340; 230; 115; 37; 24; 20; 16,5; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3 кВ [1].

3.2. Приведение в относительных единицах

Для расчета в относительных единицах вводятся базисные величины S_δ (МВА), U_δ (кВ) на ступени, выбранной в качестве основной. При этом электродвижущая сила (ЭДС) E (при необходимости) и сопротивления x (Ом), заданные в именованных единицах, приводятся к основной ступени напряжения и выражаются в относительных единицах по следующим формулам (при условии $U_{och} = U_\delta$):

точное приведение	приближенное приведение
$E_{*\delta} = \frac{E}{U_\delta} (k_1 k_2 \dots k_n)$;	$E_{*\delta} = \frac{E}{U_h}$;

(3.1)

$x_{*\delta} = x \frac{S_\delta}{U_\delta^2} (k_1 k_2 \dots k_n)^2$;	$x_{*\delta} = x \frac{S_\delta}{U_{ncp}^2}$.
---	--

(3.2)

Если ЭДС и сопротивления рассматриваемых элементов заданы в относительных единицах при номинальных условиях, то их приведенные к базисным условиям и основной ступени напряжения относительные величины равны:

точное приведение	приближенное приведение
$E_{*\delta} = E_{*h} \frac{U_h}{U_\delta} (k_1 k_2 \dots k_n)$;	$E_{*\delta} = E_{*h}$;

(3.3)

$$x_{*\delta} = x_{*\delta} \left(\frac{U_h}{U_\delta} \right)^2 \frac{S_\delta}{S_h} (k_1 k_2 \dots k_n)^2; \quad x_{*\delta} = x_{*_h} \frac{S_\delta}{S_h}. \quad (3.4)$$

В выражениях (3.1—3.4) U_h определяется на той ступени напряжения, где находится элемент, подлежащий приведению; $k_1 \dots k_n$ определяется как отношение междуфазных напряжений холостого хода соответствующих обмоток трансформаторов по направлению от основной ступени к той ступени, элементы которой подлежат приведению.

Обычно в именованных единицах задано сопротивление воздушных линий, кабелей и реакторов, а в относительных единицах при номинальных условиях — сопротивление генераторов ($x_{*_h} = x_d''$, $x_{*_h} = x_2$) и сопротивление трансформаторов ($x_{*_h} = \frac{U_{\kappa\%}}{100}$).

3.3. Параметры элементов для отдельных последовательностей

Параметры элементов для схемы прямой последовательности определяются заданием, в котором они даны в относительных единицах при номинальных условиях для заданного элемента, либо именованных единицах (воздушные линии, реакторы). Дополнительно расчет параметров отдельных последовательностей производится следующим образом.

Генераторы. Сопротивления прямой последовательности генераторов в начальный момент времени определяется в соответствии с формулой

$$x_r = x_d'' \frac{S_\delta}{S_h}, \quad (3.5)$$

где x_d'' — сверхпереходное сопротивление в относительных единицах;

S_h — номинальная мощность генератора.

Сопротивление обратной последовательности генераторов определяется по формуле

$$x_{2\Gamma} = x_2 \frac{S_\delta}{S_h}, \quad (3.6)$$

где x_2 — определяется по табл. 2.3.

Схема соединения обмоток трансформаторов исключает прохождение через генератор токов нулевой последовательности.

Обобщенная нагрузка. Ее сопротивление для прямой последовательности

$$x_h = 1,2 \frac{S_\delta}{S_h}.$$

Для обратной последовательности

$$x_{2h} = 0,35 \frac{S_\delta}{S_h}.$$

Сопротивление нулевой последовательности обобщенной нагрузки определяется сопротивлениями и схемами соединения входящих в нее элементов. Обычно это только понижающие трансформаторы, подключенные к сети 110 кВ и выше, имеющие заземленную нейтраль. Рекомендуется принимать

$$x_{0h} = 0,15 \frac{S_\delta}{S_h}.$$

Здесь S_h — номинальная мощность нагрузки.

Трансформаторы. Для трансформаторов сопротивления распределения прямой и обратной последовательностей

$$x_{1m} = x_{2m} = \frac{U_{k\%}}{100} \frac{S_\delta}{S_h}, \quad (3.7)$$

где $U_{k\%}$ — напряжение короткого замыкания трансформатора;

S_h — номинальная мощность трансформатора.

Сопротивление нулевой последовательности определяется схемой соединения обмоток [1]. При учете трансформатора заданной схемы соединения обмоток в схеме замещения нулевой последовательности его сопротивление можно принять равным [2]

$$x_{0m} = 0,85x_{1m}.$$

Автотрансформатор. Сопротивления автотрансформатора высокого, среднего и низкого напряжения

$$x_B = \frac{0,5(U_{\kappa BC} + U_{\kappa BH} - U_{\kappa CH})}{100} \frac{S_\delta}{S_h}, \quad (3.8)$$

$$x_C = \frac{0,5(U_{\kappa BC} + U_{\kappa CH} - U_{\kappa BH})}{100} \frac{S_\delta}{S_h}, \quad (3.9)$$

$$x_H = \frac{0,5(U_{\kappa BH} + U_{\kappa CH} - U_{\kappa BC})}{100} \frac{S_\delta}{S_h}. \quad (3.10)$$

Автотрансформатор вводится в схему нулевой последовательности своей схемой замещения без учета сопротивления ветви намагничивания.

Система. Для системы конечной и бесконечной мощности при заземленной нейтрали рекомендуется принимать

$$x_{1c} = x_{2c}, \quad x_{0c} = 0.$$

Сопротивление прямой последовательности системы при известном значении S'' $x_{1c} = x_{2c} = 1,0 \frac{S_\delta}{S''}$, для системы бесконечной мощности $x_{1c} = x_{2c} = 0$.

Токоограничивающий реактор. Для реакторов

$$x_p = x_{p(O_m)} \frac{S_\delta}{U_{hyst}^2}, \quad (3.11)$$

где $x_{p(O_m)}$ — сопротивление реактора в именованных единицах;

U_{hyst} — среднее номинальное напряжение ступени, где установлен реактор.

Воздушные линии. Для воздушных линий сопротивления прямой (обратной) последовательностей

$$x_{1, \ell} = x_{2, \ell} = x_{yo} \ell \frac{S_\delta}{U_h^2}, \quad (3.12)$$

где $x_{y\vartheta}$ — удельное сопротивление линии; ℓ — длина линии;
 U_n — среднее номинальное напряжение.

Сопротивление нулевой последовательности воздушных линий значительно большее, чем прямой (обратной) последовательности. Рекомендуется принимать это сопротивление, как для воздушной линии с тросами [1]:

- для одноцепной линии $x_{0\vartheta} = 3,0 \cdot x_{1\vartheta}$;
- для двухцепной линии $x_{0\vartheta} = 4,7 \cdot x_{1\vartheta}$.

Формулы (3.6) — (3.12) учитывают, что параметры всех элементов приближенно приведены на базисную ступень напряжения и переведены в относительные единицы при базисных условиях.

3.4. Схемы замещения отдельных последовательностей

Схемы замещения отдельных последовательностей (прямой, обратной и нулевой) составляются в соответствии с заданной схемой электрических соединений.

Схема прямой последовательности соответствует схеме, составленной для расчета симметричного трехфазного КЗ. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени генераторы и нагрузки вводятся в нее соответствующими реактивностями и ЭДС [1].

Использование метода расчетных кривых не требует определения ЭДС и учета нагрузок, поскольку они учитываются самим методом. Генераторы при этом вводятся в схему замещения прямой последовательности своими сверхпереходными сопротивлениями x_d'' для любого расчетного момента времени. В методе спрямленных характеристик для каждого момента времени требуется новая схема замещения и обязателен учет нагрузок. Аналитический расчет в сочетании с использованием типовых кривых изменения тока позволяет обойтись одной схемой замещения, составленной для начального момента КЗ с учетом нагрузок.

При аналитическом определении ЭДС E_0'' можно использовать формулу

$$E_0'' = \sqrt{\left(U_0 \cos \phi_0\right)^2 + \left(U_0 \sin \phi_0 + I_0 x_d''\right)^2} \quad (3.13)$$

либо

$$E_0'' = U_0 + I_0 x_d'' \sin \phi_0, \quad (3.14)$$

где U_0 , I_0 , ϕ_0 соответствуют доаварийному (номинальному) режиму.

Для введения ЭДС в схему важно, чтобы значения всех входящих в выражения (3.13) и (3.14) величин были выражены в относительных единицах при базисных либо номинальных условиях с учетом того, что при приближенном приведении $E_{0\delta}'' = E_{0n}''$.

Для системы значения ЭДС для любого момента времени следует принимать равными 1,0 о.е. При условии, что при КЗ в сетях 110 кВ и выше нагрузка электрически удалена от места КЗ, учитывать подпитку от обобщенной нагрузки в начальный момент КЗ не требуется [2].

Схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности, но не содержит ЭДС, а сопротивления элементов считаются постоянными для любого момента времени. Генераторы вводятся в схему своими сопротивлениями обратной последовательности x_2 .

Схема нулевой последовательности определяется соединением обмоток участвующих в ней трансформаторов и автотрансформаторов и способом заземления нейтралей [1, 2, 3]. В общем случае эта схема отличается от схем прямой и обратной последовательностей. При составлении схемы необходимо помнить о том, что ток нулевой последовательности является по существу однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю. Ток нулевой последовательности при поперечной несимметрии (КЗ) может протекать только в сторону обмоток трансформаторов, соединенных в звезду с заземленной нейтралью.

Началом схемы прямой, обратной или нулевой последовательностей считают точку нулевого потенциала, а концом — точку, где возникла несимметрия. К концу схемы приложено напряжение соответствующей последовательности $(\dot{U}_{\kappa 1}, \dot{U}_{\kappa 2}, \dot{U}_{\kappa 0})$.

Каждая схема должна быть преобразована до одного результирующего сопротивления соответствующей последовательности относительно точки КЗ $x_{1\Sigma}, x_{2\Sigma}, x_{0\Sigma}$ и ЭДС E_Σ . При преобразованиях следует использовать основные приемы эквивалентных преобразований, известные из теории линейных цепей [7]. Конечной целью преобразования является определение взаимных сопротивлений от каждой группы однотипных либо равноудаленных источников до точки КЗ. Все расчеты ведутся для трех значащих цифр.

3.5. Нахождение взаимных сопротивлений

Для нахождения взаимного сопротивления между источником и точкой КЗ могут быть использованы методы, известные из теории линейных цепей [7]: преобразование звезды в треугольник, треугольника в звезду, многолучевой звезды в полный многоугольник.

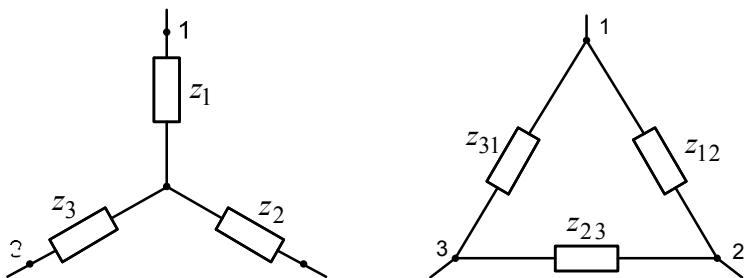


Рис. 3.1. Преобразование трехлучевой звезды в треугольник

$$z_{12} = z_1 + z_2 + \frac{z_1 z_2}{z_3}; \quad z_{23} = z_2 + z_3 + \frac{z_2 z_3}{z_1}; \quad z_{31} = z_3 + z_1 + \frac{z_3 z_1}{z_2}.$$

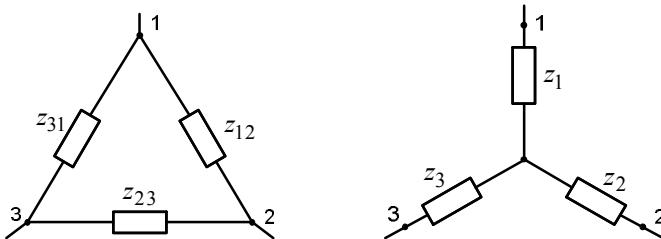


Рис. 3.2. Преобразование треугольника в звезду

$$z_1 = \frac{z_{12}z_{31}}{z_{12} + z_{23} + z_{31}} ; \quad z_2 = \frac{z_{12}z_{23}}{z_{12} + z_{23} + z_{31}} ; \quad z_3 = \frac{z_{23}z_{31}}{z_{12} + z_{23} + z_{31}} .$$

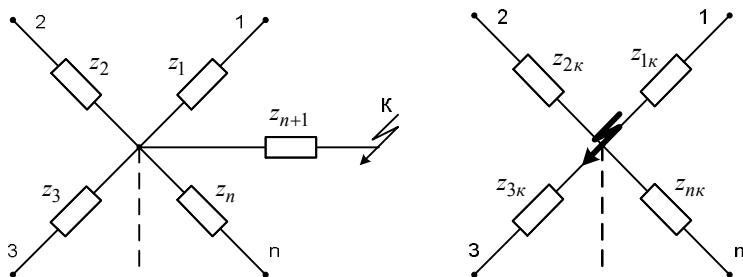


Рис. 3.3. Преобразование многолучевой звезды

$$z_{1K} = z_1 z_{n+1} \sum \frac{1}{z_i} , \quad z_{2K} = z_2 z_{n+1} \sum \frac{1}{z_i} , \quad \dots , \quad z_{nK} = z_n z_{n+1} \sum \frac{1}{z_i} ,$$

где $z_i = z_1 + z_2 + \dots + z_n + z_{n+1}$.

Для нахождения распределения токов в схеме при использовании метода спрямленных характеристик и аналитического метода можно обойтись без преобразования схемы, а непосредственно использовать известные методы расчета: метод контурных токов, метод узловых напряжений и т.д.

В курсовой работе требуется произвести преобразование схемы к простейшему виду с помощью коэффициентов распределения (токораспределения). Коэффициенты распределения (доли от единичного тока) находятся как относительные токи для начального момента КЗ, и найденное токораспределение распространяется

на весь процесс, вплоть до $t = \infty$. Это, естественно, вносит определенную погрешность, так как сопротивления источников при переходном процессе изменяются во времени.

По известному коэффициенту распределения C_m любого m -го источника питания и результирующему сопротивлению схемы x_{Σ} можно найти взаимное сопротивление между этим источником и точкой КЗ.

$$x_{km} = \frac{x_{\Sigma}}{C_m}. \quad (3.15)$$

Коэффициент распределения находится развертыванием схемы от результирующего сопротивления до исходной схемы. Ниже показан способ нахождения коэффициентов распределения для случаев параллельного и последовательного сложения сопротивлений.

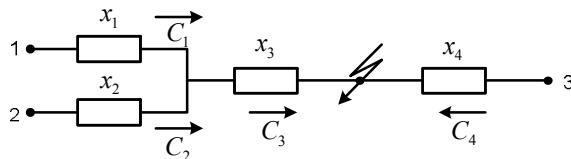
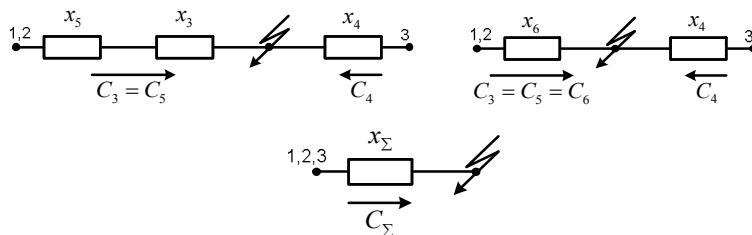


Рис. 3.4. Исходная схема



$$x_5 = x_1 / / x_2$$

$$x_6 = x_5 + x_3$$

$$x_{\Sigma} = x_6 / / x_4$$

Рис. 3.5. Этапы преобразования исходной схемы

Расчет коэффициентов распределения

$$C_{\Sigma} = 1, \quad C_4 = \frac{x_{\Sigma}}{x_4}, \quad C_6 = C_3 = C_5 = \frac{x_{\Sigma}}{x_6}, \quad C_1 = \frac{x_5}{x_1} C_3, \quad C_2 = \frac{x_5}{x_2} C_3,$$

$$C_1 + C_2 + C_4 = 1.$$

Для схемы, преобразованной из треугольника в звезду или наоборот, расчет коэффициентов распределения можно произвести применением 1-го или 2-го законов Кирхгофа, то есть:

$$\sum_i C_i = 0 \text{ — для узла; } \sum_j C_j x_j = 0 \text{ — для контура.}$$

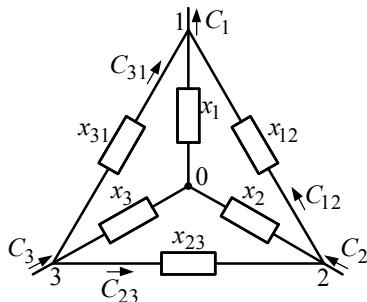


Рис. 3.6. Исходная схема

Для принятого на рис. 3.6 направления коэффициентов распределения

$$\text{узел 1 } C_{31} + C_{12} - C_1 = 0,$$

$$\text{узел 2 } C_{23} - C_{12} + C_2 = 0,$$

$$\text{узел 3 } -C_{31} - C_{23} + C_3 = 0;$$

$$\text{контур 1201} \quad -C_{12}x_{12} + C_2x_2 + C_1x_1 = 0,$$

$$\text{контур 2302} \quad -C_{23}x_{23} + C_3x_3 - C_2x_2 = 0,$$

$$\text{контур 3103} \quad C_{31}x_{31} - C_1x_1 - C_3x_3 = 0.$$

Из полученных соотношений могут быть найдены неизвестные коэффициенты распределения. Сумма коэффициентов распределения всех источников питания должна равняться единице.

4. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

4.1. Общие положения

Указанный расчет имеет назначение, в первую очередь, определить значение периодической слагающей полного тока КЗ в первый период (начальное значение) как основной расчетной величины. Периодическая слагающая полного тока определяется как алгебраическая сумма периодических слагающих тока отдельных источников питания и в общем случае зависит от времени

$$I_{nkt\Sigma} = \sum_m I_{nktm}. \quad (4.1)$$

Способы нахождения периодической слагающей зависят от расчетного метода и приведены ниже.

4.2. Расчет периодической слагающей тока короткого замыкания

Аналитический метод. Метод применяется при известных значениях ЭДС и сопротивлений для интересующего момента времени. Обычно это первый период короткого замыкания, или начальный момент времени. При наличии нескольких источников необходимо выделять ток от системы (неизменный во времени) и ток от остальных генераторов либо токи отдельных групп генераторов, для которых периодическая составляющая тока во времени изменяется.

Начальное значение периодического тока КЗ от источника с номером m определяется аналитически по формуле:

$$I''_{nk\,m} = \frac{E''_{0m}}{x_{km}} I_{\delta}, \quad (4.2)$$

где $I_\delta = \frac{S_\delta}{\sqrt{3}U_\delta}$ (кА) — базисный ток, приведенный к номинальному напряжению в точке КЗ;

$x_{\kappa m}$ — взаимное сопротивление между точкой КЗ и ЭДС источника.

Далее используется формула (4.1). Результирующий начальный ток также может быть найден по выражению

$$I''_{n\kappa\Sigma} = \frac{E''_{0\Sigma}}{x_\Sigma} I_\delta, \quad (4.3)$$

где $E''_{0\Sigma} = \frac{\sum E_i Y_i}{\sum Y_i}$ — эквивалентная ЭДС; $Y_i = \frac{1}{x_{\kappa i}}$.

Метод типовых кривых. Для нахождения тока для произвольного момента времени (в курсовой работе для времени $t = 0,1$ с и $t = \infty$ ($t = 3$ с)) совместно с аналитическим расчетом начального тока используются типовые кривые изменения тока (прил. Г). При этом ток от системы не изменяется во времени, а ток от остальных генераторов либо токи отдельных групп генераторов определяются с использованием типовых кривых.

Для этого предварительно аналитически определяется $I''_{n\kappa\Gamma}$ и номинальный ток $I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_H}$ для выделенной группы генераторов, и их отношение $\alpha = I''_{n\kappa\Gamma} / I_H$. При определении α оба тока должны быть определены в одной системе единиц и при одном напряжении. Для полученного значения α по типовым кривым определяют изменение начального значения тока генератора к заданному моменту времени $\gamma = \frac{I_{n\kappa t_r}}{I''_{n\kappa\Gamma}}$ и находят необходимую величину периодической слагающей тока КЗ генератора $I_{n\kappa t_r} = \gamma I''_{n\kappa\Gamma}$, и в месте КЗ

$$I_{n\kappa t} = \gamma I''_{n\kappa\Gamma}. \quad (4.4)$$

Ток от системы принимают неизменным во времени и суммируют с полученными для заданного момента времени значениями тока для генераторов. Установившееся значение тока КЗ определяется для времени $t = 3$ с.

Метод расчетных кривых. Этот метод, разработанный в 1940 г., позволяет определить относительное значение периодической составляющей тока КЗ в зависимости от электрической удаленности и времени [2]. Расчет необходимо производить отдельно от различных по типу и удаленности групп генераторов (расчет по индивидуальному изменению).

Найденные в разделе 3.5 взаимные реактивности выражают в относительных единицах, приведенных к суммарной номинальной мощности генераторов, входящих в соответствующую группу выделенных источников, то есть определяют расчетные реактивности

$$x_{km\text{расч}} = x_{km} \frac{S_{n\Sigma m}}{S_\delta}. \quad (4.5)$$

По соответствующим расчетным кривым (прил. Д) определяется кратность периодической составляющей тока КЗ для интересующего момента времени $I_{*_{nktm}}$ и находится действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ в интересующий момент времени

$$I_{nktm} = I_{*_{nktm}} I_{nm}, \quad (4.6)$$

где $I_{nm} = \frac{S_{n\Sigma}}{\sqrt{3}U_n}$ — номинальный ток источников.

Далее используется формула (4.1).

Если расчетное сопротивление ветви с выделенной группой источников удовлетворяет неравенству

$$x_{km\text{расч}} > 3,$$

то ток КЗ не зависит от времени и определяется аналитически

$$I_{nktm} = \frac{I_\delta}{x_{km}} = \frac{I_{nm}}{x_{km\text{расч}}}. \quad (4.7)$$

Выражение (4.7) используется также для нахождения тока КЗ от системы.

Метод спрямленных характеристик. Особенностью метода является необходимость определения ЭДС генераторов E_t и их сопротивлений x_t для каждого момента времени по специальным кривым (прил. Е). Это требует многократного нахождения взаимных сопротивлений и ЭДС отдельных групп генераторов. При использовании этого метода генераторы с АРВ могут работать в двух режимах:

а) режим подъема возбуждения при

$$x_{\text{вн}} \leq x_{\text{kpt}}, \quad I_{\text{nkt}} \geq I_{\text{kpnkt}}; \quad (4.8)$$

б) режим нормального напряжения:

$$x_{\text{вн}} \geq x_{\text{kpt}}, \quad I_{\text{nkt}} \leq I_{\text{kpnkt}}. \quad (4.9)$$

В первом случае (формула 4.8) генератор вводится в схему замещения своими ЭДС E_t и x_t , определенными по кривым типовых генераторов, либо при известных параметрах генераторов с учетом выражений:

$$\begin{aligned} E_t &= E_{qnp} - (E_{qnp} - E_0'') \delta_{E_t}; \\ x_t &= x_d - (x_d - x_d'') \sigma_{xt}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

где δ_{E_t} и σ_{xt} — коэффициенты, определяемые кривыми метода спрямленных характеристик, для генераторов имеющих нетиповые параметры;

E_{qnp} — предельное (потолочное) значение синхронной ЭДС;

x_d — синхронное сопротивление генератора.

Для режима нормального напряжения (4.9) генератор должен быть введен в схему $E_t = U_h$, $x_t = 0$. Критические реактивности и токи определяются выражениями:

$$x_{\text{kpt}} = x_t \frac{U_h}{E_t - U_h}, \quad (4.11)$$

$$I_{kp\eta kt} = \frac{U_h}{x_{kpt}}. \quad (4.12)$$

Для расчета схемы все генераторы с АРВ в зависимости от ожидаемого для них режима вводятся в схему либо своими x_t и E_t , либо $E_t = U_h$, $x_t = 0$.

После преобразования схемы и нахождения результирующих ЭДС $E_{t\Sigma}$ и $x_{t\Sigma}$ ток КЗ для интересующего момента времени определяется по выражению

$$I_{nkt} = \frac{E_{t\Sigma}}{x_{t\Sigma}} I_\delta. \quad (4.13)$$

После нахождения тока КЗ проверяется правильность выбранных режимов генераторов для сложных схем. Для этого находятся токи генераторов и сравниваются с критическими. При этом должны совпадать выбранные и полученные в результате расчета условия (4.8 и 4.9). Если окажется, что режимы выбраны неверно, то их следует изменить и повторить расчет. Для развертывания схемы допускается использовать коэффициенты распределения, найденные для схемы начального момента КЗ.

При найденных взаимных сопротивлениях между источником и точкой КЗ режим может быть задан достоверно в первом же расчете.

Установившееся значение тока КЗ определяется при $t = 4$ с.

4.3. Определение ударного тока, действующего значения тока КЗ за первый период и мощности короткого замыкания

Ударный ток в месте КЗ определяется по значению периодической составляющей тока КЗ при $t = 0$

$$i_y = k_y \sqrt{2} I''_{nk}, \quad (4.14)$$

где $k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_9}}$.

Эквивалентная постоянная времени T_9 [1, 2] при расчете в относительных единицах определяется как

$$T_{9(o.e)} = \frac{x_\Sigma}{r_\Sigma}, \quad (4.15)$$

а при расчете в именованных единицах —

$$T_{9(c)} = \frac{x_\Sigma}{\omega r_\Sigma}, \quad (4.16)$$

где x_Σ — результирующее реактивное сопротивление схемы относительно точки КЗ, определенное без учета активных сопротивлений;

r_Σ — результирующее активное сопротивление схемы относительно точки КЗ (подсчитывается по схеме, составленной из одних активных сопротивлений, приведенных к тем же базисным условиям и ступени напряжения, что и реактивные);

$\omega = 2\pi f = 314$ — угловая частота $\left(\frac{1}{c}\right)$.

При неизвестных активных сопротивлениях допускается определять ударный ток по усредненным значениям ударного коэффициента [4]:

$k_y = 1,95$ — при КЗ на шинах генератора;

$k_y = 1,9$ — при КЗ на сборных шинах повышенного напряжения электрических станций;

$k_y = 1,8$ — при КЗ в распределительных сетях.

Действующее значение полного тока КЗ за первый период его изменения определяется в соответствии с выражением

$$I_y = I''_{nk} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \quad (4.17)$$

Тепловой импульс рассчитывается по начальному значению периодической составляющей тока КЗ. Периодический ток I''_{nk} принимают незатухающим и тепловой импульс $B_k (\kappa A^2 \cdot c)$ определяют по формуле

$$B_k = I_{nk}''^2 \cdot (t_{omk} + T_3), \quad (4.18)$$

где $t_{omk} = 0,1$ с — время отключения КЗ.

Мощность КЗ в месте повреждения является условной величиной, определяемой по формуле

$$S_{kt} = \sqrt{3}U_n I_{nkt}. \quad (4.19)$$

4.4. Определение остаточных напряжений в узлах системы

Необходимо определить остаточные напряжения в заданной точке системы. При этом следует помнить, что по мере удаления от точки КЗ напряжение увеличивается и, согласно рис. 4.1, определяется по формуле

$$U_{ocm} = E - I_i x_i. \quad (4.20)$$

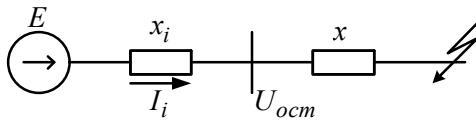


Рис. 4.1. Расчетная схема

4.5. Пример расчета домашнего задания практическими методами

В соответствии с заданием (прил. А) требуется рассчитать значение периодической составляющей тока КЗ для времени $t = 0$ с и $t = 0,5$ с при трехфазном КЗ в точке К5 станции № 1 (рис. 4.2) тремя методами: методом типовых кривых; методом расчетных кривых; методом спрямленных характеристик.

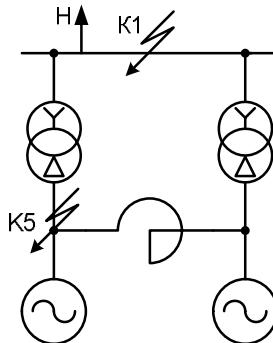


Рис. 4.2. Схема станции № 1

Исходные данные для расчетов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Исходные данные

Турбогенераторы с АРВ						Трансформаторы					Реактор			
P_h МВт	$\cos \phi_h$	U_h кВ	x_d''	x_2	$\frac{x}{r}$	S_h МВА	U_B кВ	U_H кВ	U_k %	$\frac{x}{r}$	U_h кВ	I_h кА	x_p Ом	$\frac{x_p}{r}$
200	0,85	10,5	0,19	0,232	120	200	121	10,5	10,5	30	10	2	0,4	40

Мощность нагрузки $S_h = 2 * S_{hT} = 2 * 200 = 400$ МВА. Сопротивление нагрузки $x_h = 1,2$; $E_{qnp} = 3,0$; $x_d = 1,2$.

Расчеты производятся в относительных единицах при приближенном приведении. В качестве базисной мощности принимается мощность нагрузки $S_b = 400$ МВА. За базисное напряжение принимается среднее номинальное напряжение генератора $U_b = U_{cp.h} = 10,5$ кВ. Базисный ток, приведенный к среднему базисному номинальному напряжению в точке КЗ, равен

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_b} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 22 \text{ кА.}$$

Расчет методом типовых кривых. В расчете методом типовых кривых учитываются нагрузка и ЭДС источников. Составляется схема замещения станции 1 для начального момента времени (см. рис. 4.3) и определяются параметры схемы замещения с приведением их значений к базисным величинам.

$$x_1 = x_h \frac{S_\delta}{S_h} = 1,2 \cdot \frac{400}{400} = 1,2;$$

$$x_2 = x_5 = \frac{U_{\kappa\%}}{100} \frac{S_\delta}{S_h} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{400}{200} = 0,21;$$

$$x_3 = x_6 = x_d'' \frac{S_\delta}{S_h} = 0,19 \frac{400 \cdot 0,85}{200} = 0,323;$$

$$x_4 = x_{p(O_m)} \frac{S_\delta}{U_{h\text{усм}}^2} = 0,4 \frac{400}{10,5^2} = 1,45.$$

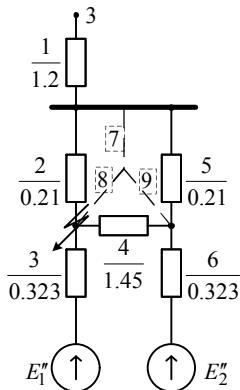


Рис. 4.3

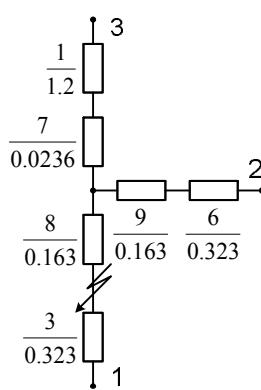


Рис. 4.4

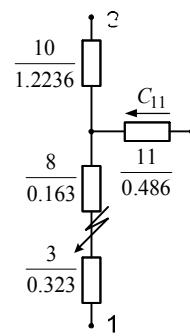


Рис. 4.5

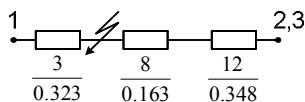


Рис. 4.6

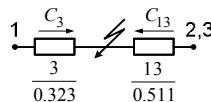


Рис. 4.7

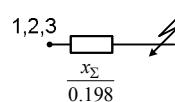


Рис. 4.8

Свертывание схемы замещения (рис. 4.4—4.8)

$$x_7 = \frac{x_2 x_5}{x_2 + x_5 + x_4} = 0,0236; \quad x_8 = \frac{x_2 x_4}{x_2 + x_5 + x_4} = 0,163;$$

$$x_9 = \frac{x_5 x_4}{x_2 + x_5 + x_4} = 0,163; \quad x_{10} = x_1 + x_7 = 1,2236;$$

$$x_{11} = x_9 + x_6 = 0,486; \quad x_{12} = \frac{x_{10} x_{11}}{x_{10} + x_{11}} = 0,348;$$

$$x_{13} = x_{12} + x_8 = 0,511; \quad x_{\Sigma} = \frac{x_{13} x_3}{x_{13} + x_3} = 0,198.$$

Определение коэффициентов распределения:

$$c_3 = \frac{x_{\Sigma}}{x_3} = \frac{0,198}{0,323} = 0,613; \quad c_{13} = \frac{x_{\Sigma}}{x_{13}} = \frac{0,198}{0,511} = 0,387;$$

$$c_{11} = \frac{x_{12}}{x_{11}} c_{13} = \frac{0,348}{0,486} 0,387 = 0,277.$$

Определение взаимных сопротивлений:

$$x_{\kappa 1} = \frac{x_{\Sigma}}{c_3} = \frac{0,198}{0,613} = 0,323; \quad x_{\kappa 2} = \frac{x_{\Sigma}}{c_{11}} = \frac{0,198}{0,277} = 0,715.$$

Определение ЭДС источников:

$$\begin{aligned} E_1'' &= E_2'' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I_{*H} x_d'')^2} = \\ &= \sqrt{1 \cdot 0.85^2 + (1 \cdot 0.53 + 0.85 \cdot 0.19)^2} = 1,1. \end{aligned}$$

Здесь I_{*H} относительный ток нагрузки генератора при номинальных условиях

$$I_{*H} = \frac{S_{nacp}}{S_{nG}} = \frac{S_{nacp} \cos \varphi}{P_{nG}} = \frac{200 \cdot 0,85}{200} = 0,85.$$

Периодическая составляющая тока КЗ для момента времени $t = 0$ с.

$$I''_{n\varepsilon 1*} = \frac{E''_1}{x_{\kappa 1}} = \frac{1,1}{0,323} = 3,41; I''_{n\varepsilon 2*} = \frac{E''_2}{x_{\kappa 2}} = \frac{1,1}{0,715} = 1,54;$$

$$I_{n\Sigma(0)*} = 3,41 + 1,54 = 4,95.$$

В именованных единицах:

$$I''_{n\varepsilon 1} = I''_{n\varepsilon 1*} I_{\delta} = 3,41 \cdot 22 = 75,02 \text{ кА}; I''_{n\varepsilon 2} = 1,54 \cdot 22 = 33,88 \text{ кА};$$

$$I_{n\Sigma(0)} = I_{n\Sigma(0)*} I_{\delta} = 4,95 \cdot 22 = 108,9 \text{ кА}.$$

Для аналитического расчета начального момента расчет пропризвести также в именованных единицах со всеми преобразованиями, показанными выше. Убедиться, что результат не зависит от выбранной системы единиц.

Определение номинальных токов генераторов в о.е. при базисных условиях.

$$I_{H1*} = I_{H2*} = \frac{P_h}{\cos \varphi S_{\delta}} = \frac{200}{0,85 \cdot 400} = 0,588.$$

Электрическая удаленность точки КЗ от источника α и отношение γ для момента времени $t = 0,5$ с определяются по типовым кривым (прил. Г).

$$\alpha_1 = \frac{I''_{\varepsilon 1*}}{I_{H1*}} = \frac{3,41}{0,588} = 5,8; \quad \alpha_2 = \frac{I''_{\varepsilon 2*}}{I_{H2*}} = \frac{1,54}{0,588} = 2,62.$$

Для момента времени $t = 0,5$ с: $\gamma_1 = 0,64$; $\gamma_2 = 0,84$.

Периодическая составляющая тока КЗ для момента времени $t = 0,5$ с.

$$I_{n\varepsilon 1(0,5)*} = I''_{\varepsilon 1} \gamma_1 = 3,41 \cdot 0,64 = 2,18;$$

$$I_{n\varepsilon 2(0,5)*} = I''_{\varepsilon 2} \gamma_2 = 1,54 \cdot 0,84 = 1,29;$$

$$I_{n\Sigma(0,5)} = 2,18 + 1,29 = 3,47.$$

В именованных единицах

$$I_{n\Sigma(0,5)} = I_{n\Sigma(0,5)*} I_{\delta} = 3,47 \cdot 22 = 76,34 \text{ кА}.$$

Расчет методом расчетных кривых. В расчете этим методом нагрузка и ЭДС источников не учитываются. Составляется расчетная

схема замещения (рис. 4.9) и определяются ее параметры с приведением к базисным величинам. Сопротивления трансформаторов, генераторов и реактора, приведенные к базисным величинам, были найдены выше (метод типовых кривых) и приведены на расчетной схеме. После преобразований (рис 4.10, 4.11) находится результирующее сопротивление схемы замещения $x_{\Sigma} = \frac{x_2 x_8}{x_2 + x_8} = 0,216$ и взаимные сопротивления x_2 и x_8 .

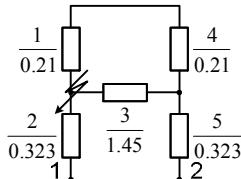


Рис. 4.9

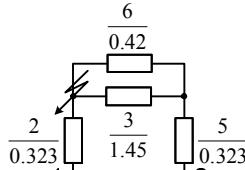


Рис. 4.10

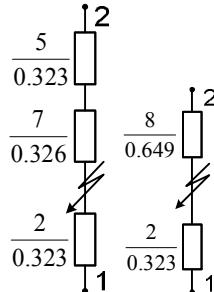


Рис. 4.11

Определение расчетных реактивностей.

$$x_{k1\text{расч}} = x_2 \frac{S_{h1}}{S_{\delta}} = 0,323 \frac{200}{0,85 \cdot 400} = 0,19;$$

$$x_{k2\text{расч}} = x_8 \frac{S_{h2}}{S_{\delta}} = 0,649 \frac{200}{0,85 \cdot 400} = 0,38.$$

По расчетным кривым (прил. Д) определяется кратность периодической составляющей тока КЗ для момента времени $t = 0$ с и $t = 0,5$ с.

Для момента времени $t = 0$ с: $I_{*nk(0)1} = 5,4$; $I_{*nk(0)2} = 2,7$.

Для момента времени $t = 0,5$ с: $I_{*nk(0,5)1} = 3,15$; $I_{*nk(0,5)2} = 1,95$.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени $t = 0$ с.

$$I_{*nk(0)1} = I_{*nk(0)1} I_{h1*} = 5,4 \cdot 0,588 = 3,17;$$

$$I_{*nk(0)2} = I_{*nk(0)2} I_{h2*} = 2,7 \cdot 0,588 = 1,59;$$

$$I_{*n\Sigma(0)} = 3,17 + 1,59 = 4,76.$$

В именованных единицах

$$I_{n\Sigma(0)} = I_{*n\Sigma(0)} I_\delta = 4,76 \cdot 22 = 104,7 \text{ кА.}$$

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ при $t = 0,5$ с.

$$I_{*nk(0,5)1} = I_{*nk(0,5)1} I_{n1*} = 3,15 \cdot 0,588 = 1,852;$$

$$I_{*nk(0,5)2} = I_{*nk(0,5)2} I_{n2*} = 1,95 \cdot 0,588 = 1,147;$$

$$I_{n\Sigma(0,5)} = 1,852 + 1,147 = 3.$$

В именованных единицах

$$I_{n\Sigma(0,5)} = I_{*n\Sigma(0,5)} I_\delta = 3 \cdot 22 = 66 \text{ кА.}$$

Расчет методом спрямленных характеристик. В расчете этим методом необходимо определить ЭДС генераторов E_t и их сопротивления x_t для каждого момента времени по специальным кривым (прил. Е). Предварительно определяется ток возбуждения предшествующего режима для выбора необходимых кривых.

$$\begin{aligned} E_0 &= I_{f0} = \sqrt{(U_n \cos \varphi)^2 + (U_n \sin \varphi + I_{*n} x_d)^2} = \\ &= \sqrt{1 \cdot 0,85^2 + (1 \cdot 0,53 + 0,85 \cdot 1,2)^2} = 1,77. \end{aligned}$$

Для момента времени $t = 0$ с: $E_t = 1,08$; $x_t = 0,15$.

Для момента времени $t = 0,5$ с: $E_t = 1,23$; $x_t = 0,3$.

Расчет периодической составляющей тока КЗ для момента времени $t = 0$ с представляет собой обычный аналитический расчет, только ЭДС генератора и его сопротивление определяются по кривым, и необходимо учесть нагрузку.

Схема замещения аналогична схеме замещения в методе типовых кривых (рис. 4.3), и ее параметры, приведенные к базисным условиям

$$x_m = x_2 = x_5 = 0,21; \quad x_p = x_4 = 1,45; \quad x_h = x_1 = 1,2;$$

$$x_e = x_3 = x_6 = x_t \cdot \frac{S_{\delta}}{S_h} = 0,15 \cdot \frac{400 \cdot 0,85}{200} = 0,255.$$

Схема замещения сворачивается (рис. 4.4—4.8):

$$x_7 = 0,0236; \quad x_8 = 0,163; \quad x_9 = 0,163; \quad x_{10} = 1,2236;$$

$$x_{11} = 0,418; \quad x_{12} = 0,312; \quad x_{13} = 0,475; \quad x_{\Sigma} = \frac{x_{13}x_3}{x_{13} + x_3} = 0,166.$$

Взаимные сопротивления между источниками и точкой КЗ могут быть определены как с помощью коэффициентов распределения, так и непосредственным преобразованием из звезды в треугольник схемы (рис. 4.5).

Сопротивление первого генератора $x_3 = x_{K1} = 0,255$ уже является взаимным, а взаимное сопротивление между вторым генератором и точкой КЗ

$$x_{K2} = x_8 + x_{11} + \frac{x_8 \cdot x_{11}}{x_{10}} = 0,163 + 0,418 + \frac{0,163 \cdot 0,418}{1,2236} = 0,637.$$

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ

$$I_{n\epsilon 1*} = \frac{E_{t1}}{x_{\kappa 1}} = \frac{1,08}{0,255} = 4,23; \quad I_{n\epsilon 2*} = \frac{E_{t2}}{x_{\kappa 2}} = \frac{1,08}{0,637} = 1,69;$$

$$I_{n\Sigma*} = 4,23 + 1,69 = 5,92.$$

В именованных единицах

$$I_{n\Sigma} = I_{n\Sigma*} I_{\delta} = 5,92 \cdot 22 = 130 \text{ кА.}$$

При расчете периодической составляющей тока КЗ для момента времени $t = 0,5$ схема замещения аналогична схеме замещения в методе типовых кривых (рис. 4.3), и ее параметры, приведенные к базисным условиям

$$x_m = x_2 = x_5 = 0,21; \quad x_p = x_4 = 1,45; \quad x_h = x_1 = 1,2;$$

$$x_e = x_3 = x_6 = x_t \cdot \frac{S_{\delta}}{S_h} = 0,3 \cdot \frac{400 \cdot 0,85}{200} = 0,51.$$

Схема замещения сворачивается (рис. 4.4—4.8)

$$x_7 = 0,0236; \quad x_8 = 0,163; \quad x_9 = 0,163; \quad x_{10} = 1,2236;$$

$$x_{11} = 0,673; \quad x_{12} = 0,434; \quad x_{13} = 0,597; \quad x_{\Sigma} = \frac{x_{13}x_3}{x_{13} + x_3} = 0,275.$$

Взаимные сопротивления:

$$x_{K2} = x_8 + x_{11} + \frac{x_8 \cdot x_{11}}{x_{10}} = 0,926.$$

Внешнее по отношению ко второму генератору сопротивление определяется согласно рис. 4.12:

$$x_{\text{вн}} = x_{K2} - x_{\varepsilon 2} = 0,926 - 0,51 = 0,416.$$

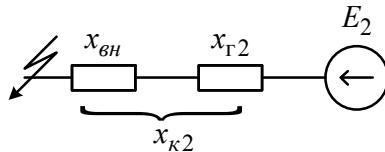


Рис. 4.12. Расчетная схема

Критическое сопротивление

$$x_{kp} = x_t \frac{U_h}{E_t - U_h} = 0,3 \frac{1}{1,23 - 1} = 1,3; \quad x_{kp\delta} = 1,3 \frac{S_{\delta}}{S_{h\Gamma 2}} = 2,6.$$

Так как $x_{\text{вн}} < x_{kp}$, то генераторы работают в режиме подъема возбуждения и вводятся в схему замещения своими E_t и x_t определенными по кривым.

Периодическая составляющая тока КЗ для момента времени $t = 0,5$ с.

$$I_{*n\varepsilon 1(0,5)} = \frac{E_{t1}}{x_{\kappa 1}} = \frac{1,23}{0,51} = 2,412; \quad I_{*n\varepsilon 2(0,5)} = \frac{E_{t2}}{x_{\kappa 2}} = \frac{1,23}{0,926} = 1,328;$$

$$I_{*n\Sigma(0,5)} = 2,412 + 1,328 = 3,74.$$

В именованных единицах

$$I_{n\Sigma(0,5)} = I_{*n\Sigma(0,5)} I_\delta = 3,74 \cdot 22 = 82,28 \text{ кА.}$$

Большая разница в полученных значениях токов КЗ по отношению к другим расчетным методам объясняется тем, что приняты кривые типовых турбогенераторов с $x_d'' = 0,15$. Для генераторов с известными параметрами удобнее использовать вспомогательные кривые метода для δ_{Et} и δ_{xt} и находить E_t и x_t для времени $t = 0,5$ с по формулам (4.10). Так, при $E_{q,np} = 3$; $x_d = 1,2$ и найденным по кривым $\delta_{Et} = 0,93$ и $\delta_{xt} = 0,86$

$$E_t = E_{q,np} - (E_{q,np} - E_0'') \delta_{Et} = 3 - (3 - 1,1) \cdot 0,93 = 1,23;$$

$$x_t = x_d - (x_d - x_d'') \delta_{xt} = 1,2 - (1,2 - 0,19) \cdot 0,86 = 0,33.$$

В этом случае расчет начального значения тока для времени $t = 0$ с совпадает с расчетом, полученным по методу типовых кривых, так как $\delta_{Et} = \delta_{xt} = 1$.

Расчет периодической составляющей тока КЗ для момента времени $t = 0,5$ с.

Схема замещения, как и раньше, аналогична схеме замещения в методе типовых кривых (рис. 4.3), и ее параметры, приведенные к базисным условиям:

$$x_m = x_2 = x_5 = 0,21; \quad x_p = x_4 = 1,45; \quad x_h = x_1 = 1,2;$$

$$x_e = x_3 = x_6 = x_t \frac{S_\delta}{S_h} = 0,33 \frac{400 \cdot 0,85}{200} = 0,561.$$

Схема замещения сворачивается (рис. 4.4—4.8)

$$x_7 = 0,0236; \quad x_8 = 0,163; \quad x_9 = 0,163; \quad x_{10} = 1,2236;$$

$$x_{11} = 0,724; \quad x_{12} = 0,455; \quad x_{13} = 0,618; \quad x_\Sigma = \frac{x_{13}x_3}{x_{13} + x_3} = 0,117.$$

Определение коэффициентов распределения:

$$c_3 = \frac{x_{\Sigma}}{x_3} = \frac{0,294}{0,561} = 0,524; \quad c_{13} = \frac{x_{\Sigma}}{x_{13}} = \frac{0,294}{0,618} = 0,476;$$

$$c_{11} = \frac{x_{12}}{x_{11}} c_{13} = \frac{0,455}{0,724} 0,476 = 0,3.$$

Определение взаимных сопротивлений:

$$x_{\kappa 1} = \frac{x_{\Sigma}}{c_3} = \frac{0,294}{0,524} = 0,561; \quad x_{\kappa 2} = \frac{x_{\Sigma}}{c_{11}} = \frac{0,294}{0,3} = 0,98.$$

Периодическая составляющая тока КЗ для момента времени $t = 0,5$ с

$$I_{*n_{\Sigma} 1(0,5)} = \frac{E_{t1}}{x_{\kappa 1}} = \frac{1,23}{0,561} = 2,19; \quad I_{*n_{\Sigma} 2(0,5)} = \frac{E_{t2}}{x_{\kappa 2}} = \frac{1,23}{0,98} = 1,25;$$

$$I_{*n_{\Sigma}(0,5)} = 2,19 + 1,25 = 3,44.$$

В именованных единицах

$$I_{n_{\Sigma}(0,5)} = I_{*n_{\Sigma}(0,5)} I_{\delta} = 3,44 \cdot 22 = 75,7 \text{ кА.}$$

Погрешность определения начального тока КЗ методом расчетных кривых по отношению к аналитическому расчету не превышает

$$\varepsilon_0 = \frac{108,9 - 104,7}{108,9} = 3,8\%.$$

Максимальная погрешность определения тока всеми методами для времени $t = 0,5$ с не превышает

$$\varepsilon_{0,5} = \frac{76,34 - 66}{66} = 15,7\%.$$

Расчет ударного тока КЗ.

Активные сопротивления определяются по отношению:

$r_i = \frac{x_i}{x/r}$. Сопротивления элементов определяются в относительных единицах при базисных условиях по схеме (рис. 4.9). Активное

сопротивление нагрузки не учитывается. Ударный ток рассчитывается для каждого генератора.

$$\text{Сопротивления генераторов: } r_2 = r_5 = \frac{0,323}{120} = 0,0027,$$

$$\text{Сопротивления трансформаторов: } r_1 = r_4 = \frac{0,21}{30} = 0,007,$$

$$\text{Сопротивление реактора: } r_3 = \frac{1,45}{40} = 0,0363.$$

Свертывание схемы замещения (рис. 4.9—4.11):

$$r_2 = r_{K1} = 0,0027; \quad T_{a1} = \frac{x_2}{r_{K1}} = \frac{0,323}{0,0027} = 119,6;$$

$$T_{a1(c)} = \frac{T_{a1}}{\omega} = \frac{119,6}{314} = 0,381 \text{ с.}$$

$$r_6 = r_1 + r_4 = 0,014; \quad r_7 = \frac{r_6 r_3}{r_6 + r_3} = 0,0101;$$

$$r_8 = r_{K2} = r_7 + r_5 = 0,0128;$$

$$T_{a2} = \frac{x_8}{r_{K1}} = \frac{0,649}{0,0128} = 50,7; \quad T_{a2(c)} = \frac{T_{a2}}{\omega} = \frac{50,7}{314} = 0,161 \text{ с.}$$

Если T_a в относительных единицах, то

$$k_{y1} = 1 + e^{-\frac{0,01\omega}{T_{a1}}} = 1 + e^{-\frac{0,01 \cdot 314}{119,6}} = 1,974, \quad k_{y2} = 1 + e^{-\frac{0,01\omega}{T_{a2}}} = 1 + e^{-\frac{0,01 \cdot 314}{50,7}} = 1,94.$$

Ударный ток определяется по формуле (4.14):

$$i_{y1} = k_{y1} \sqrt{2} I''_{n\Gamma 1} = 1,974 \cdot \sqrt{2 \cdot 75,02} = 209,4 \text{ кА};$$

$$i_{y2} = 1,94 \cdot \sqrt{2 \cdot 33,88} = 92,9 \text{ кА};$$

$$i_{y\Sigma} = i_{y1} + i_{y2} = 209,4 + 92,9 = 302,3 \text{ кА.}$$

Действующее значение тока КЗ за первый период его изменения:

$$I_{y1} = I''_{n\Gamma 1} \sqrt{1 + 2(k_{y1} - 1)^2} = 75,02 \sqrt{1 + 2 \cdot (1,974 - 1)^2} = 129 \text{ кА};$$

$$I_{y2} = 33,88 \sqrt{1 + 2 \cdot (1,94 - 1)^2} = 57,7 \text{ кА};$$

$$I_{y\Sigma} = \sqrt{I_{y1}^2 + I_{y2}^2} = \sqrt{(129)^2 + (57,7)^2} = 141,3 \text{ кА}.$$

Тепловой импульс тока КЗ:

$$B_{K1} = I''_{n\Gamma 1}^2 (t_{omk} + T_{al}) = (75,02)^2 \cdot (0,5 + 0,381) = 4958 \text{ кA}^2 \cdot c;$$

$$B_{K2} = (33,88)^2 \cdot (0,5 + 0,161) = 759 \text{ кA}^2 \cdot c;$$

$$B_{K\Sigma} = B_{K1} + B_{K2} = 4958 + 759 = 5717 \text{ кA}^2 \cdot c.$$

Мощность КЗ

в момент времени $t = 0$:

$$S''_k = \sqrt{3} U_{cp,h} I''_{n\Sigma(0)} = \sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 108,9 = 1980 \text{ МВА};$$

в момент времени $t = 0,5$ с (время отключения КЗ):

$$S_{k(0.5)} = \sqrt{3} U_{cp,h} I_{n\Sigma(0.5)} = \sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 76,34 = 1388 \text{ МВА}.$$

4.6. Пример расчета симметричного трехфазного КЗ курсовой работы

Все расчеты будут приводиться согласно следующим исходным данным: схема системы № 1 — рисунок 2.1; линии электропередачи — таблица 2.1 (вариант 3); состояние нейтралей трансформаторов — таблица 2.2 (вариант 1); станции 1, 2, 3 — таблица 2.3 (вариант 5); автотрансформатор — таблица 2.3 (вариант 2).

4.6.1. Расчет параметров и преобразования схемы замещения

Расчет произведем в относительных единицах без учета со- противлений нагрузки. В качестве базисной мощности принимается мощность системы

$$S_{\delta} = S'' = 2000 \text{ MVA.}$$

За базисное напряжение принимается среднее номинальное напряжение сети в точке КЗ: $U_{\delta} = U_{cp.h} = 115 \text{ кВ.}$

Базисный ток приведенный к среднему базисному номинальному напряжению в точке КЗ:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta}} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 10,041 \text{ кА.}$$

Составляется исходная схема замещения (схема замещения прямой последовательности) по схеме электрических соединений системы № 1.

Определяются параметры схемы замещения с приведением их значений к базисным величинам.

Сопротивления генераторов определяются по формуле (3.5):

$$x_1 = \frac{\left(0,195 \cdot \frac{2000 \cdot 0,85}{300}\right)}{4} = 0,276, \quad x_{5'} = x_{5''} = 1,615, \quad x_8 = 0,633.$$

Сопротивления трансформаторов — по формуле (3.7):

$$x_2 = \frac{\left(\frac{10,5}{100} \cdot \frac{2000}{400}\right)}{4} = 0,131, \quad x_{4'} = x_{4''} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{2000}{200} = 1,05,$$

$$x_9 = \frac{\left(\frac{10,5}{100} \cdot \frac{2000}{125}\right)}{6} = 0,28.$$

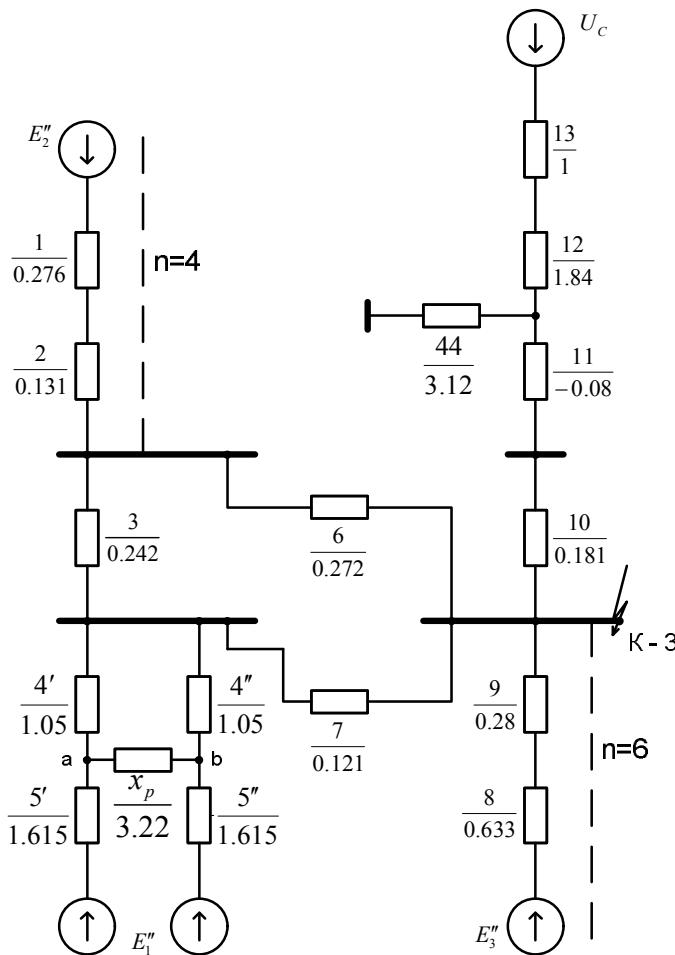


Рис. 4.13. Схема замещения прямой последовательности

Сопротивление реактора — по формуле (3.11):

$$x_p = 0,4 \cdot \frac{2000}{15,75^2} = 3,22 .$$

Сопротивления линий — по формуле (3.12):

$$x_3 = 0,4 \cdot 4 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,242, \quad x_6 = 0,4 \cdot 4,5 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,272,$$

$$x_7 = 0,4 \cdot 2 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,121, \quad x_{10} = 0,4 \cdot 3 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,181.$$

Сопротивления автотрансформатора — по формулам (3.8—3.10):

$$x_{11} = \frac{0,5 \cdot (11+19-31)}{100} \cdot \frac{2000}{125} = -0,08,$$

$$x_{12} = \frac{0,5 \cdot (11+31-19)}{100} \cdot \frac{2000}{125} = 1,84,$$

$$x_{44} = \frac{0,5 \cdot (31+19-11)}{100} \cdot \frac{2000}{125} = 3,12.$$

$$\text{Сопротивление системы: } x_{13} = \frac{S_\delta}{S''} = \frac{2000}{2000} = 1.$$

Так как ток при внешнем КЗ не протекает через реактор, то из схемы замещения реактор может быть исключен или закорочен (кроме КЗ в точке К5). Обмотка НН автотрансформатора также исключается из расчета симметричного КЗ, так как через нее не протекает ток (кроме КЗ в точке К10).

Теперь сворачиваем схему замещения прямой последовательности.

Расчет (рис. 4.14):

$$x_4 = \frac{x_{4'}}{2} = \frac{1,05}{2} = 0,525, \quad x_5 = \frac{x_{5'}}{2} = \frac{1,615}{2} = 0,807,$$

$$x_{14} = x_1 + x_2 = 0,276 + 0,131 = 0,408,$$

$$x_{15} = x_4 + x_5 = 0,525 + 0,807 = 1,333,$$

$$x_{16} = x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} = 0,181 - 0,08 + 1,84 + 1 = 2,941,$$

$$x_{17} = x_8 + x_9 = 0,28 + 0,633 = 0,913.$$

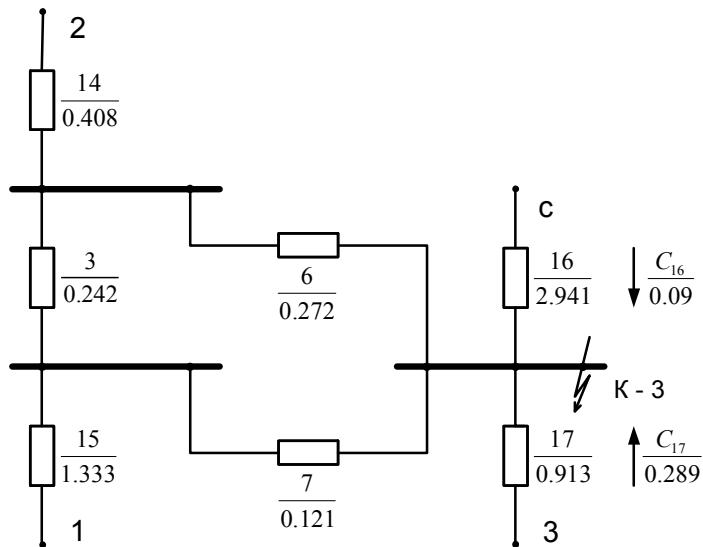


Рис. 4.14

Расчет (рис. 4.15):

$$x_{18} = \frac{x_6 x_3}{x_3 + x_6 + x_7} = \frac{0,272 \cdot 0,242}{0,242 + 0,272 + 0,121} = 0,104,$$

$$x_{19} = \frac{x_7 x_3}{x_3 + x_6 + x_7} = \frac{0,121 \cdot 0,242}{0,242 + 0,272 + 0,121} = 0,046,$$

$$x_{20} = \frac{x_6 x_7}{x_3 + x_6 + x_7} = \frac{0,272 \cdot 0,121}{0,242 + 0,272 + 0,121} = 0,052,$$

$$x_{21} = \frac{x_{16} x_{17}}{x_{16} + x_{17}} = \frac{2,941 \cdot 0,913}{2,941 + 0,913} = 0,697.$$

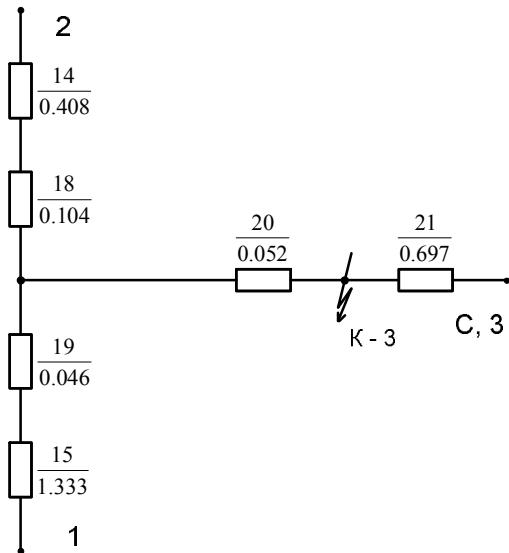


Рис. 4.15

Расчет (рис. 4.16):

$$x_{22} = x_{14} + x_{18} = 0,408 + 0,104 = 0,511,$$

$$x = x_{19} + x_{15} = 0,046 + 1,333 = 1,379.$$

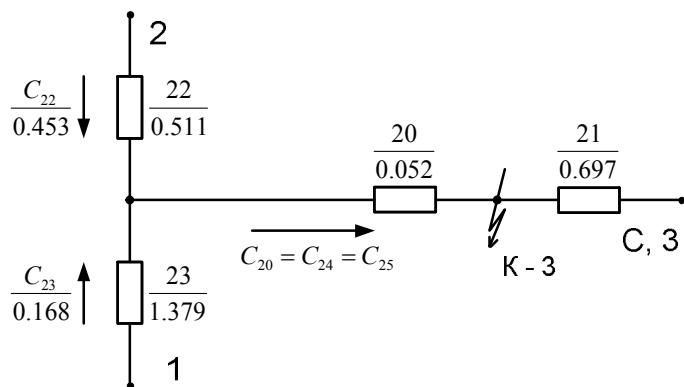


Рис. 4.16

Расчет (рис. 4.17): $x = \frac{xx}{x+x} = \frac{0,511 \cdot 1,379}{0,511 + 1,379} = 0,373$.

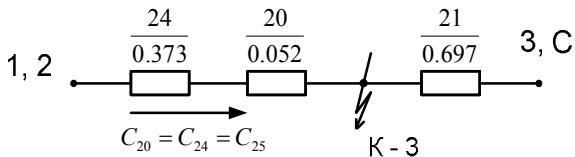


Рис. 4.17

Расчет (рис. 4.18): $x = x_1 + x_2 = 0,373 + 0,052 = 0,425$.

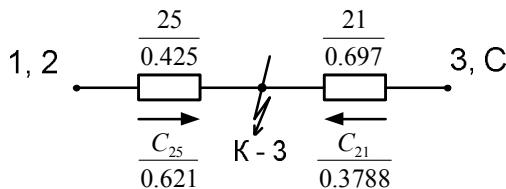


Рис. 4.18

Расчет (рис. 4.19): $x = \frac{xx}{x+x} = \frac{0,425 \cdot 0,697}{0,425 + 0,697} = 0,264$.

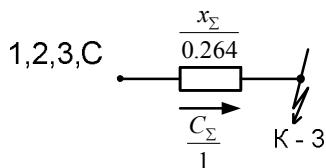


Рис. 4.19. Результирующее сопротивление

4.6.2. Определение долевого участия источников в суммарном начальном токе КЗ и расчет взаимных сопротивлений

Необходимо определить долевое участие каждой электрической станции и системы в начальном токе КЗ с использованием коэффициентов распределения.

Коэффициенты распределения находятся развертыванием схемы от результирующего сопротивления до исходной схемы.

Единичный ток распределяется обратно пропорционально сопротивлению.

$$\text{Расчет (рис. 4.18): } c = \frac{x}{x} = \frac{0,264}{0,697} = 0,379, \quad c = \frac{x}{x} = \frac{0,264}{0,425} = 0,621.$$

$$\text{Расчет (рис. 4.17, 4.16): } c_{\text{ст}} = c_{\text{с}} = c_{\text{н}} = 0,621,$$

$$c_{\text{ст}} = \frac{x}{x} c = \frac{0,373}{0,511} \cdot 0,621 = 0,453, \quad c_{\text{с}} = \frac{x}{x} c = \frac{0,373}{1,379} \cdot 0,621 = 0,168.$$

Расчет (рис. 4.18, 4.14):

$$c_{\text{н}} = \frac{x}{x} \cdot c = \frac{0,697}{2,941} \cdot 0,379 = 0,0898, \quad c_{\text{ст}} = \frac{x}{x} \cdot c = \frac{0,697}{0,913} \cdot 0,379 = 0,289.$$

Выполняется проверка

$$c_{\text{ст}} + c_{\text{с}} + c_{\text{н}} + c_{\text{н}} = 0,453 + 0,168 + 0,0898 + 0,289 = 1.$$

Определяются взаимные сопротивления станций и системы (рис. 4.20)

$$x_{\text{ст}} = \frac{x}{c} = \frac{0,264}{0,0898} = 2,941, \quad x_{\text{с}} = \frac{x}{c} = \frac{0,264}{0,168} = 1,57,$$

$$x_{\text{н}} = \frac{x}{c} = \frac{0,264}{0,453} = 0,582, \quad x_{\text{н}} = \frac{x}{c} = \frac{0,264}{0,289} = 0,913.$$

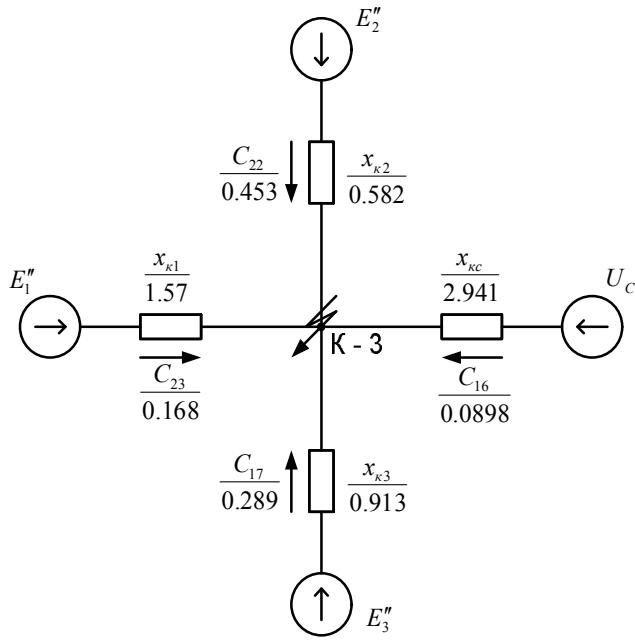


Рис. 4.20. Разделение источников

4.6.3. Определение периодической составляющей тока

Найдем ЭДС E'' первой станции:

$$\begin{aligned}
 E''_{\delta 1} &= \sqrt{(U \cos \phi)^2 + (U \sin \phi + I_{*\delta} x''_{d*\delta})^2} = \\
 &= \sqrt{1 \cdot 0,85^2 + (1 \cdot 0,53 + 0,235 \cdot 0,807)^2} = 1,114 \\
 I_{*\delta} &= \frac{S_h}{S_{\delta}} = \frac{2P_h}{S_{\delta} \cos \phi} = \frac{2 \cdot 200}{2000 \cdot 0,85} = 0,235, \quad x'' = x = 0,807.
 \end{aligned}$$

Так как при приближенном приведении $E'' = E''_1$, то ЭДС каждой системы можно определить по паспортным данным.

$$\begin{aligned}
 E''_1 &= E_1 = 1,114, \quad E''_2 = \sqrt{1 \cdot 0,85 + (1 \cdot 0,53 + 1 \cdot 0,195)} = 1,117; \\
 E''_3 &= 1,098.
 \end{aligned}$$

Токи отдельных источников в начальный момент времени:

$$I''_c = \frac{U_c}{x_{kc}} = \frac{1}{2,941} = 0,34, \quad I''_{cm1} = \frac{E''_1}{x_{\kappa 1}} = \frac{1,114}{1,57} = 0,71,$$

$$I'' = \frac{E''}{x} = \frac{1,117}{0,582} = 1,919, \quad I'' = \frac{E''}{x} = \frac{1,098}{0,913} = 1,203.$$

Суммарный ток трехфазного короткого замыкания:

$$I'' = 0,34 + 0,71 + 1,919 + 1,203 = 4,17.$$

В именованных единицах $I'' = I''_I = 4,17 \cdot 10,041 = 41,87$ кА.

Эквивалентная ЭДС:

$$E'' = \frac{\Sigma E Y}{\Sigma Y} = \frac{\frac{1,114}{1,57} + \frac{1,117}{0,582} + \frac{1,098}{0,913} + \frac{1}{2,941}}{\frac{1}{1,57} + \frac{1}{0,582} + \frac{1}{0,913} + \frac{1}{2,941}} = 1,1.$$

Суммарный ток трехфазного короткого замыкания $I''_{\Sigma} = \frac{E''_{\Sigma}}{x_{\Sigma}} = \frac{1,1}{0,264} = 4,17$, то есть ток совпадает с найденным током от отдельных источников.

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ для момента времени $t = 0,1$ с и $t = 3$ с находится методом типовых кривых (прил. Г).

Номинальные токи станций в о.е.

$$I_{n1} = \frac{n P_n}{\cos \phi S_{\delta}} = \frac{2 \cdot 200}{0,85 \cdot 2000} = 0,235, \quad I_{n2} = \frac{4 \cdot 300}{0,85 \cdot 2000} = 0,706,$$

$$I = \frac{6 \cdot 90}{0,9 \cdot 2000} = 0,3.$$

При электрической удаленности точки КЗ от источника α отношение γ для момента времени определяется по типовым кривым:

$$\alpha_1 = \frac{I''_{cm1}}{I_{n1}} = \frac{0,71}{0,235} = 3,021, \quad \alpha_2 = \frac{I''_{cm2}}{I_{n2}} = \frac{1,919}{0,706} = 2,718,$$

$$\alpha_3 = \frac{I''_{cm3}}{I_{h3}} = \frac{1,203}{0,3} = 4,01.$$

Для момента времени $t = 0,1$ с: $\gamma_1 = 0,88$, $\gamma_2 = 0,91$, $\gamma_3 = 0,84$.

Для момента времени $t = 3$ с: $\gamma_1 = 0,71$, $\gamma_2 = 0,9$, $\gamma_3 = 0,71$.

Периодическая составляющая тока КЗ для момента времени $t = 0,1$ с

$$I_{cm1(0,1)} = I''_{cm1}\gamma_1 = 0,71 \cdot 0,88 = 0,62, \quad I_{cm2(0,1)} = I''_{cm2}\gamma_2 = 1,919 \cdot 0,91 = 1,75,$$

$$I_{cm3(0,1)} = I''_{cm3}\gamma_3 = 1,203 \cdot 0,84 = 1,01.$$

Суммарный ток трехфазного короткого замыкания для $t = 0,1$ с

$$I_{\Sigma(0,1)} = 0,62 + 1,75 + 1,01 + 0,34 = 3,72,$$

$$I_{\Sigma(0,1)} = I_{\Sigma(0,1)}I_{\delta} = 3,72 \cdot 10,041 = 37,35 \text{ кА.}$$

Периодическая составляющая тока КЗ для момента времени $t = 3$ с

$$I_{cm1(3)} = I''_{cm1}\gamma_1 = 0,71 \cdot 0,84 = 0,596, \quad I_{cm2(3)} = I''_{cm2}\gamma_2 = 1,919 \cdot 0,9 = 1,727,$$

$$I_{cm3(3)} = I''_{cm3}\gamma_3 = 1,203 \cdot 0,71 = 0,854.$$

Суммарный ток трехфазного короткого замыкания

$$I_{\Sigma(3)} = 0,596 + 1,727 + 0,854 + 0,34 = 3,517,$$

$$I_{\Sigma(3)} = I_{\Sigma(3)}I_{\delta} = 3,517 \cdot 10,041 = 35,314 \text{ кА.}$$

4.6.4. Определение ударного тока КЗ

Активные сопротивления определяются по отношению:

$$r_i = \frac{x_i}{x/r}.$$

Сопротивления генераторов:

$$r_1 = \frac{0,276}{130} = 0,0021, \quad r_5 = \frac{0,807}{120} = 0,0067, \quad r_8 = \frac{0,633}{50} = 0,0127.$$

Сопротивления трансформаторов:

$$r_2 = \frac{0,131}{40} = 0,0033, \quad r_4 = \frac{0,525}{30} = 0,0175, \quad r_9 = \frac{0,28}{30} = 0,0093.$$

Сопротивления линий: отношение:

$$\frac{x}{r} = \frac{0,4}{0,075} = 5,33, \quad r_3 = \frac{0,242}{5,33} = 0,045, \quad r_6 = \frac{0,272}{5,33} = 0,051,$$

$$r_7 = \frac{0,121}{5,33} = 0,023, \quad r_{10} = \frac{0,181}{5,33} = 0,034.$$

Сопротивления автотрансформатора:

$$r_{11,12} = \frac{x_{BC}}{30} = \frac{1,76}{30} = 0,0587.$$

Сопротивление системы: $r_{13} = 0$.

Схема замещения для активных сопротивлений составляется и преобразуется аналогично схеме замещения для реактивных сопротивлений (рис. 4.13—4.19):

$$r_{14} = 0,0021 + 0,0033 = 0,0054,$$

$$r_{15} = 0,0067 + 0,0175 = 0,0242, \quad r_{16} = 0,034 + 0,0587 + 0 = 0,0927,$$

$$r_{17} = 0,0127 + 0,0093 = 0,022, \quad r_{18} = 0,019, \quad r_{19} = 0,0087,$$

$$r_{20} = 0,0098, \quad r_{21} = \frac{0,0927 \cdot 0,022}{0,0927 + 0,022} = 0,0178,$$

$$r_{22} = 0,0054 + 0,019 = 0,024, \quad r_{23} = 0,0087 + 0,0242 = 0,0329,$$

$$r_{24} = \frac{0,024 \cdot 0,0329}{0,024 + 0,0329} = 0,0139, \quad r_{25} = 0,0098 + 0,0139 = 0,0237,$$

$$r_{\Sigma} = \frac{r_{25} \cdot r_{21}}{r_{25} + r_{21}} = \frac{0,0237 \cdot 0,0178}{0,0237 + 0,0178} = 0,01.$$

$$k_y = \frac{0,01}{1 + e^{-\frac{T_3}{T_3}}},$$

где T_3 — эквивалентная постоянная времени.

Если T_9 в относительных единицах, то

$$T_{9(o.e.)} = \frac{x_\Sigma}{r_\Sigma} = \frac{0,264}{0,01} = 26,4 \text{ о.е.,}$$

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01\omega}{T_9}} = 1 + e^{-\frac{0,01 \cdot 314}{26,4}} = 1,89.$$

Если T_9 в именованных единицах, то

$$T_{9(c)} = \frac{x_\Sigma}{r_\Sigma} = \frac{0,264}{\omega \cdot 0,01} = \frac{0,264}{314 \cdot 0,01} = 0,084 \text{ с.,}$$

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_9}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,084}} = 1,89.$$

Ударный ток определяется по формуле (4.14)

$$i_y = k_y \sqrt{2} I''_\Sigma = 1,89 \cdot \sqrt{2} \cdot 41,87 = 111,91 \text{ кА.}$$

4.6.5. Определение действующего значения тока КЗ за первый период, теплового импульса и мощности КЗ

Действующее значение тока КЗ за первый период его изменения

$$I_y = I''_\Sigma \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2} = 41,87 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,89 - 1)^2} = 67,3 \text{ кА.}$$

Тепловой импульс тока КЗ

$$B_K = I''_{nk}^2 (t_{omk} + T_9) = 41,87^2 \cdot (0,1 + 0,084) = 322,57 \text{ кA}^2 \cdot \text{с.}$$

Мощность в момент времени $t = 0,1 \text{ с}$ (время отключения КЗ)

$$S_K(0,1) = \sqrt{3} U_{cp,H} I_{\Sigma(0,1)} = \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 37,35 = 7440 \text{ МВА.}$$

4.6.6. Расчет остаточных напряжений при трехфазном КЗ

Остаточное напряжение на шинах СН автотрансформатора (в точке К4):

$$U_{CH} = U_c - I''_c(x_{13} + x_{12} + x_{11}) = 1 - 0,34 \cdot (1 + 1,84 - 0,08) = 0,062$$

или $U_{CH} = U_{K3} + I''_c x_{10} = 0 + 0,34 \cdot 0,181 = 0,062$.

В именованных единицах: $U_{CH} = \frac{U_{cp,n}}{\sqrt{3}} U_{CH} = \frac{115}{\sqrt{3}} \cdot 0,062 = 4,12$ кВ.

Остаточное напряжение в точке К5:

$$U_{K5} = E''_1 - \frac{I''_{cm1}}{2} x_5 = 1,114 - \frac{0,71}{2} \cdot 1,615 = 0,567.$$

В именованных единицах:

$$U_{K5} = \frac{U_{cp,n}}{\sqrt{3}} U_{K5} = \frac{10,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,567 = 3,44$$
 кВ.

5. РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

5.1. Общие положения

Расчет режима при несимметричном КЗ основан на использовании метода симметричных составляющих, в соответствии с которым ток и напряжение в фазах определяются как геометрическая сумма токов или напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей [2, 3, 7].

Учитывая, что полный ток в месте КЗ, а также токи обратной и нулевой последовательностей при несимметричном КЗ пропорциональны току прямой последовательности, основная задача расчета несимметричных КЗ будет заключаться в определении тока прямой последовательности. В свою очередь, ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определен как ток при трехфазном КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительную реактивность $x_{\Delta}^{(n)}$, определяемую видом КЗ.

Если не учитывать дугу в точке КЗ (металлическое КЗ), то правило эквивалентности прямой последовательности имеет вид

$$I_{\kappa 1}^{(n)} = \frac{E''_{\Sigma}}{(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}, \quad (5.1)$$

где $I_{\kappa 1}^{(n)}$ — ток прямой последовательности в точке КЗ;

E''_{Σ} , — результирующая ЭДС схемы прямой последовательности;

$x_{1\Sigma}$ — результирующее сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки КЗ;

$x_{\Delta}^{(n)}$ — дополнительная реактивность, определяемая видом КЗ.

Для расчета несимметричных КЗ используют комплексные схемы замещения [2]. Каждый вид КЗ характеризуется соответствующей комбинацией схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и определяется соотношением симметричных составляющих токов и напряжений для особой фазы. Как отдельные симметричные составляющие, так и полные величины токов и напряжений носят комплексный характер. В выражении (5.1) и в дальнейшем для упрощения записи точки над комплексными величинами ставиться не будут.

Особой принято называть фазу, которая находится в особых условиях по отношению к двум другим фазам. За особую в расчетах всегда принимают фазу А. Все дальнейшие соотношения метода симметричных составляющих даются для фазы А.

Для расчета симметричных КЗ $K^{(3)}$ используется только схема замещения прямой последовательности. При этом, независимо от точки КЗ, она сводится к эквивалентной схеме, которая указана на рисунке 5.1.

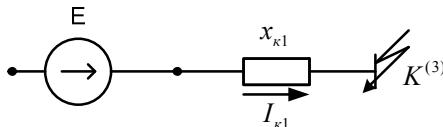


Рис. 5.1. Эквивалентная схема замещения для расчета $K^{(3)}$

Расчет двухфазного КЗ $K^{(2)}$ производится с помощью схем замещения прямой и обратной последовательностей. Эквивалентная схема замещения для данного случая изображена на рисунке 5.2.

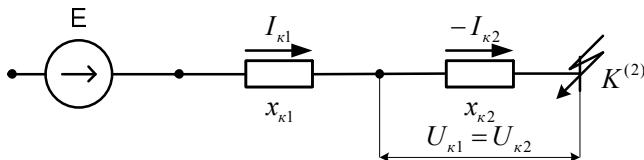


Рис. 5.2. Эквивалентная схема замещения для расчетов двухфазного короткого замыкания

Для расчета токов и напряжений при двухфазном КЗ на землю $K^{(1.1)}$ необходимо использовать схемы замещения всех трех последовательностей. Расчетная схема замещения для этого случая изображена на рисунке 5.3.

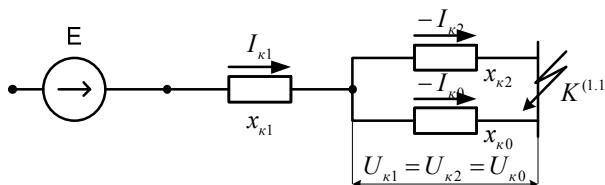


Рис. 5.3. Эквивалентная схема замещения для расчетов двухфазного короткого замыкания на землю

Расчет токов и напряжений однофазного КЗ $K^{(1)}$ в системе с заземленными нейтралями также производится с помощью схем замещения всех трех последовательностей. Расчетная схема для этого вида КЗ показана на рисунке 5.4.

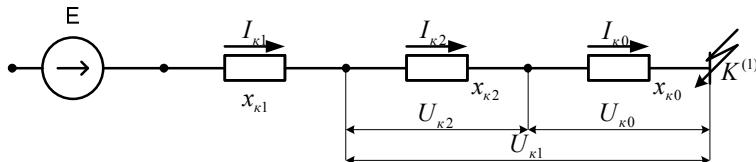


Рис. 5.4. Эквивалентная схема замещения для расчетов однофазного короткого замыкания на землю

При расчетах всех видов несимметричных коротких замыканий, в соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности, достаточно определить лишь прямую последовательность тока $I_{\kappa 1}$. Все остальные расчетные величины выражаются через $I_{\kappa 1}$ и даны в таблице 5.1.

Для определения тока прямой последовательности требуется предварительно найти результирующие реактивности схем обратной и нулевой последовательностей и дополнительные реактивности, зависящие от вида КЗ ($x_{\Delta}^{(n)}$), которые определяются по таблице 5.2.

Модуль полного тока в месте КЗ определяется как

$$I_{\kappa}^{(n)} = m^{(n)} I_{\kappa 1}^{(n)}, \quad (5.2)$$

где $m^{(n)}$ — коэффициент, зависящий от вида КЗ (табл. 5.2).

Напряжение прямой последовательности определяется по известному значению дополнительной реактивности

$$U_{\kappa 1}^{(n)} = x_{\Delta}^{(n)} I_{\kappa 1}^{(n)}. \quad (5.3)$$

Напряжения отдельных последовательностей в месте КЗ определяются в соответствии с уравнениями второго закона Кирхгофа [2]:

$$\left. \begin{aligned} U_{\kappa 1}^{(n)} &= E_{0\Sigma} - jx_{1\Sigma} I_{n\kappa 1}^{(n)} \\ U_{\kappa 2}^{(n)} &= 0 - jx_{2\Sigma} I_{n\kappa 2}^{(n)} \\ U_{\kappa 0}^{(n)} &= 0 - jx_{0\Sigma} I_{n\kappa 0}^{(n)} \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

или выражаются через основные соотношения согласно таблице 5.1.

Таблица 5.1

Основные соотношения метода симметричных составляющих

Определяемые величины	Вид короткого замыкания			
	$\kappa^{(3)}$	$\kappa^{(2)}$	$\kappa^{(1)}$	$\kappa^{(1,1)}$
$I_{\kappa 2}^{(n)}$	0	$-I_{\kappa 1}$	$I_{\kappa 1}$	$-I_{\kappa 1} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$

$I_{\kappa 0}^{(n)}$	0	0	$I_{\kappa 1}$	$-I_{\kappa 1} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$
$U_{\kappa 2}^{(n)}$	0	$U_{\kappa 1}$	$-jx_{2\Sigma} I_{\kappa 1}$	$U_{\kappa 1}$
$U_{\kappa 0}^{(n)}$	0	Значение до КЗ	$-jx_{0\Sigma} I_{\kappa 1}$	$U_{\kappa 1}$

Таблица 5.2

Расчетные соотношения дополнительной реактивности $x_{\Delta}^{(n)}$ и коэффициента $m^{(n)}$, зависящих от вида КЗ

	$\kappa^{(3)}$	$\kappa^{(2)}$	$\kappa^{(1)}$	$\kappa^{(1.1)}$
$x_{\Delta}^{(n)}$	0	$x_{2\Sigma}$	$x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$	$\frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$
$m^{(n)}$	1	$\sqrt{3}$	3	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}$

5.2. Определение остаточных напряжений при несимметричном КЗ

Составляющие напряжений отдельных последовательностей в заданном узле схемы можно определять суммированием (с учетом знаков) напряжений соответствующих последовательностей в месте КЗ и падений напряжений в сопротивлениях, включенных в схемах каждой последовательности между точкой КЗ и интересующим узлом m по соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} U_{1m}^{(n)} &= U_{\kappa 1}^{(n)} + jx_{\kappa 1m} I_{\kappa 1m}^{(n)} \\ U_{2m}^{(n)} &= U_{\kappa 2}^{(n)} + jx_{\kappa 2m} I_{\kappa 2m}^{(n)} \\ U_{0m}^{(n)} &= U_{\kappa 0}^{(n)} + jx_{\kappa 0m} I_{\kappa 0m}^{(n)} \end{aligned} \right\}, \quad (5.5)$$

где $I_{\kappa 1m}^{(n)}$, $I_{\kappa 2m}^{(n)}$, $I_{\kappa 0m}^{(n)}$ — токи соответствующих последовательностей, протекающие по сопротивлениям $x_{\kappa 1m}$, $x_{\kappa 2m}$, $x_{\kappa 0m}$.

В расчетах методом эквивалентных преобразований удобнее определять напряжения отдельных последовательностей в заданной точке системы по падению напряжения на элементе.

Для определения токов $I_{\kappa 1m}^{(n)}$, $I_{\kappa 2m}^{(n)}$, $I_{\kappa 0m}^{(n)}$ необходимо определить токораспределение в пределах схем замещения каждой последовательности. Для схемы обратной последовательности допускается применять коэффициенты распределения, найденные для схемы замещения прямой последовательности. При расчете все входящие в формулы величины должны быть выражены в одноименных единицах — относительных, либо именованных. При переводе в именованные единицы следует пользоваться соотношением

$$x_{(O_m)} = x_* \frac{U_\delta^2}{S_\delta}. \quad (5.6)$$

Остаточные напряжения определяются по отдельным последовательностям с последующим векторным суммированием для нахождения полных величин, причем по мере удаления от точки КЗ напряжение прямой последовательности увеличивается, а напряжения обратной и нулевой последовательностей уменьшаются.

Остаточное напряжение прямой, обратной и нулевой последовательностей определяется согласно рисунку 5.5 по формулам:

$$U_{ocm1} = E - I_1 x_{c1_i}, \quad (5.7)$$

$$U_{ocm2} = I_2 x_{c2}, \quad (5.8)$$

$$U_{ocm0} = I_0 x_{c0}. \quad (5.9)$$

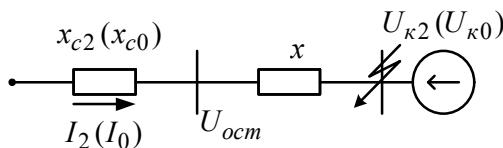


Рис. 5.5. Расчетная схема

5.3. Определение фазных величин и построение векторных диаграмм

Поскольку найденные значения определяют токи напряжения отдельных последовательностей для особой фазы, то для определения токов и напряжений в других фазах используется оператор поворота $a = 1e^{j120^\circ}$ и $a^2 = 1e^{j240^\circ}$. Для токов и напряжений фаз А, В и С имеем:

$$\begin{aligned} I_{KA}^{(n)} &= I_{\kappa 1}^{(n)} + I_{\kappa 2}^{(n)} + I_{\kappa 0}^{(n)} \\ I_{KB}^{(n)} &= a^2 I_{\kappa 1}^{(n)} + a I_{\kappa 2}^{(n)} + I_{\kappa 0}^{(n)} \\ I_{KC}^{(n)} &= a I_{\kappa 1}^{(n)} + a^2 I_{\kappa 2}^{(n)} + I_{\kappa 0}^{(n)}, \\ U_{\kappa A}^{(n)} &= U_{\kappa 1}^{(n)} + U_{\kappa 2}^{(n)} + U_{\kappa 0}^{(n)} \\ U_{\kappa B}^{(n)} &= a^2 U_{\kappa 1}^{(n)} + a U_{\kappa 2}^{(n)} + U_{\kappa 0}^{(n)} \\ U_{\kappa C}^{(n)} &= a U_{\kappa 1}^{(n)} + a^2 U_{\kappa 2}^{(n)} + U_{\kappa 0}^{(n)} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Ток, протекающий в земле при $K^{(1)}$ и $K^{(1.1)}$, определяется как

$$I_3 = 3I_{\kappa 0}^{(n)}. \quad (5.11)$$

По полученным значениям симметричных составляющих строятся векторные диаграммы токов и напряжений как отдельных последовательностей, так и полных величин. Построение векторных диаграмм следует произвести для точки короткого замыкания. Кроме этого, строятся векторные диаграммы остаточных напряжений для заданной точки системы. При трансформации отдельных последовательностей необходимо учитывать группу соединения обмоток трансформатора [2]. Так при группе соединения звезда—треугольник—11 вектор прямой последовательности поворачивается на 30° против часовой стрелки, а вектор обратной последовательности — на 30° по часовой. При этом генератор воспринимает однофазное КЗ как двухфазное. Построение следует произвести в именованных единицах с указанием масштаба. Векторные диаграммы напряжений должны вписываться в треугольник линейных напряжений. Центр треугольника

определяется напряжением смещения нейтрали (U_0). Фазные величины треугольника линейных напряжений в именованных единицах определяются по выражению

$$U_\phi = E_{*\Sigma} \frac{U_{cp.h}}{\sqrt{3}}.$$

Векторные диаграммы токов и напряжений в месте КЗ представлены на рисунках 5.6, 5.7, 5.8 для различных видов несимметричных КЗ.

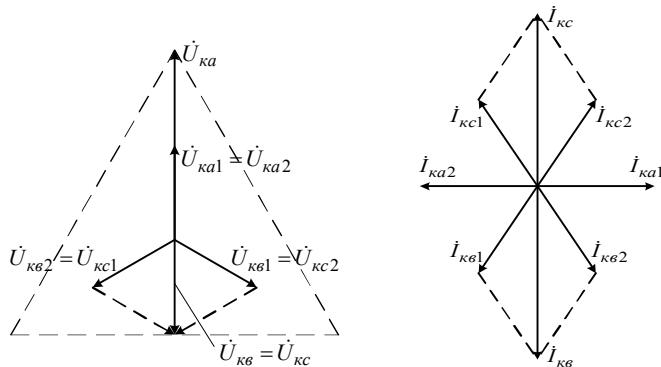


Рис. 5.6. Векторные диаграммы токов и напряжений в точке КЗ при двухфазном коротком замыкании

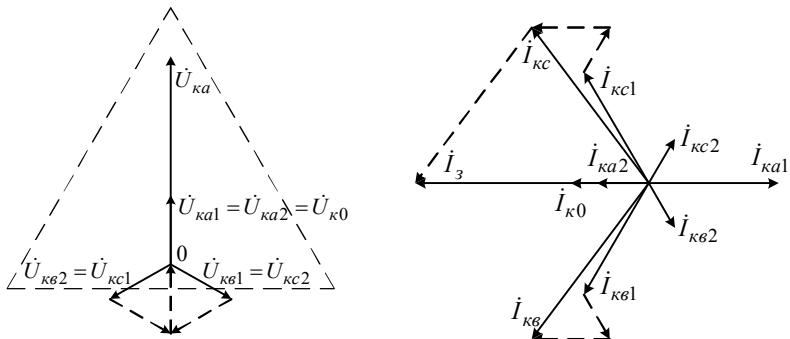


Рис. 5.7. Векторные диаграммы токов и напряжений в точке КЗ при двухфазном коротком замыкании на землю

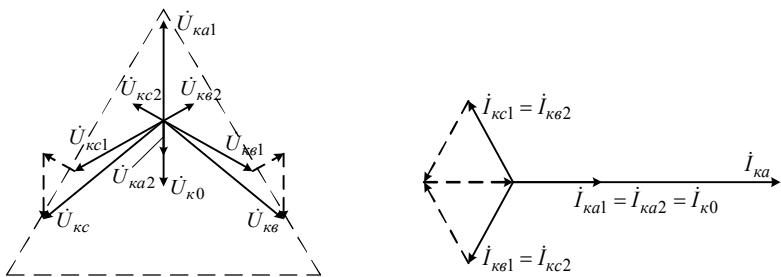


Рис. 5.8. Векторные диаграммы токов и напряжений в точке КЗ при однофазном коротком замыкании

5.4. Особенности расчета несимметричных КЗ методом типовых кривых

Использование метода типовых кривых для расчета несимметричных КЗ основано на правиле эквивалентности прямой последовательности. Расчет производится для прямой последовательности тока КЗ отдельно для каждого источника. Определяется аналитически начальный ток прямой последовательности отдельного источника $I''_{\kappa 1i}^{(n)}$ по формуле $I''_{\kappa 1i}^{(n)} = \frac{E_i}{x_{1i} + x_{\Delta i}^{(n)}}$, где $x_{\Delta i}^{(n)}$ определяется по таблице 5.2.

При этом $x_{2i} = \frac{x_{2\Sigma}}{c_{2i}} = x_{\kappa 2i}$, $x_{0i} = \frac{x_{0\Sigma}}{c_{0i}} = x_{\kappa 0i}$, где c_{2i} и c_{0i} — коэффициенты распределения для схем обратной и нулевой последовательностей соответственно.

Затем определяется удаленность КЗ нахождением расчетного коэффициента $\alpha_i = \frac{I_{\kappa 1i}}{I_{hi}}$. Для полученного значения α_i по типовым кривым определяется изменение начального значения тока прямой последовательности генератора и тока КЗ к заданному

моменту времени $\gamma_i = \frac{I_{k1it}^{(n)}}{I_{k1i}^{\prime(n)}}$ и находится необходимая величина

периодической слагающей тока КЗ в момент времени t источника

$$I_{kit}^{(n)} = m^{(n)} I_{k1i}^{\prime(n)} \gamma_i .$$

Ток от системы считается неизменным во времени и суммируется с полученными для заданного момента времени значениями тока для остальных источников

$$I_{\kappa\Sigma t}^{(n)} = \sum I_{kit}^{(n)} .$$

5.5. Пример расчета несимметричного КЗ в курсовой работе

Необходимо составить и преобразовать схемы замещения отдельных последовательностей и выполнить расчет несимметричных коротких замыканий.

5.5.1. Составление и преобразование схем отдельных последовательностей

Схема замещения обратной последовательности по структуре аналогична схеме замещения прямой последовательности, но не содержит ЭДС, а сопротивления элементов считаются постоянными для любого момента времени. Генераторы вводятся в схему своими сопротивлениями обратной последовательности (x_2).

Составляется схема замещения обратной последовательности (рис. 5.9).

Сопротивления обратной последовательности для генераторов с приведением их значения к базисным величинам:

$$x_{26} = \frac{\left(x_2 \frac{S_\delta \cos \varphi_h}{P_h} \right)}{n} = \frac{0,238 \cdot \frac{2000 \cdot 0,85}{300}}{4} = 0,337 , \quad x_{27} = 0,986 ,$$

$$x_{28} = 0,66 .$$

Схема замещения обратной последовательности сворачивается аналогично схеме замещения прямой последовательности.

Расчет (рис. 5.10):

$$x_{29} = x_{26} + x_2 = 0,337 + 0,131 = 0,468,$$

$$x_{30} = x_4 + x_{27} = 0,525 + 0,986 = 1,511,$$

$$x_{31} = x_9 + x_{28} = 0,28 + 0,66 = 0,94,$$

$$x_{32} = x_{29} + x_{18} = 0,468 + 0,104 = 0,572,$$

$$x_{33} = x_{19} + x_{30} = 0,046 + 1,511 = 1,557.$$

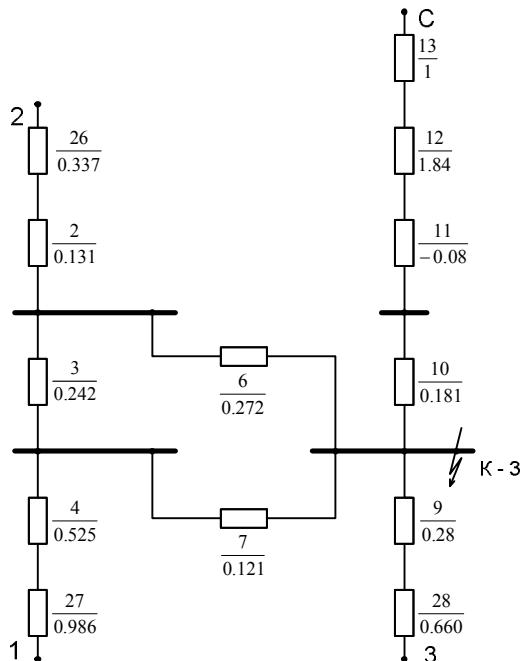


Рис. 5.9. Схема замещения обратной последовательности

Расчет (рис. 5.11):

$$x_{34} = \frac{x_{32}x_{33}}{x_{32} + x_{33}} = \frac{0,572 \cdot 1,557}{0,572 + 1,557} = 0,457,$$

$$x_{35} = \frac{x_{16}x_{31}}{x_{16} + x_{31}} = \frac{2,941 \cdot 0,94}{2,941 + 0,94} = 0,712,$$

$$x_{36} = x_{20} + x_{34} = 0,418 + 0,052 = 0,470.$$

$$x_{2\Sigma} = \frac{x_{36}x_{35}}{x_{36} + x_{35}} = \frac{0,470 \cdot 0,712}{0,470 + 0,712} = 0,283.$$

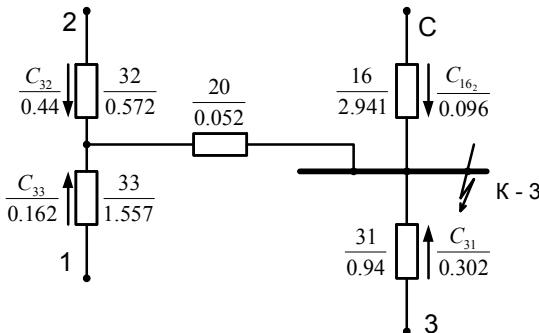


Рис. 5.10

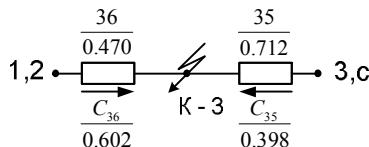


Рис. 5.11

Коэффициенты распределения от единичного тока.
Расчет (рис. 5.11):

$$c_{35} = \frac{x_{2\Sigma}}{x_{35}} = \frac{0,283}{0,712} = 0,398, \quad c_{36} = \frac{x_{2\Sigma}}{x_{36}} = \frac{0,283}{0,470} = 0,602.$$

Расчет (рис. 5.10):

$$c_{32} = \frac{x_{34}}{x_{32}} c_{36} = \frac{0,418}{0,572} \cdot 0,602 = 0,44,$$

$$c_{33} = \frac{x_{34}}{x_{33}} c_{36} = \frac{0,418}{1,557} \cdot 0,602 = 0,162,$$

$$c_{31} = \frac{x_{35}}{x_{31}} c_{35} = \frac{0,712}{0,94} \cdot 0,398 = 0,302,$$

$$c_{16_2} = \frac{x_{35}}{x_{16}} c_{35} = \frac{0,712}{2,941} \cdot 0,398 = 0,096.$$

Выполняется проверка:

$$c_{32} + c_{33} + c_{31} + c_{16_2} = 0,44 + 0,162 + 0,302 + 0,096 = 1.$$

Определяются взаимные сопротивления обратной последовательности для станций и системы (рис. 5.12)

$$x_{2c} = \frac{x_{2\Sigma}}{c_{16_2}} = \frac{0,283}{0,096} = 2,941, \quad x_{21} = \frac{x_{2\Sigma}}{c_{33}} = \frac{0,283}{0,162} = 1,747,$$

$$x_{22} = \frac{x_{2\Sigma}}{c_{32}} = \frac{0,283}{0,44} = 0,643, \quad x_{23} = \frac{x_{2\Sigma}}{c_{31}} = \frac{0,283}{0,302} = 0,94.$$

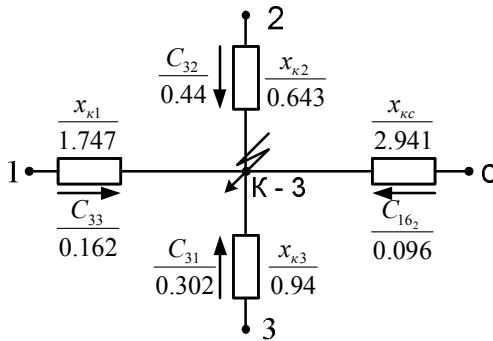


Рис. 5.12. Разделение источников схемы обратной последовательности

Схема замещения нулевой последовательности определяется участвующими в схеме трансформаторами и характером соединения их обмоток. Токи нулевой последовательности протекают через трансформаторы, нейтрали которых заземлены. Генераторы не принимают участие в схеме, т.к. оказываются отдаленными

от путей протекания токов нулевой последовательности. Для автотрансформатора учитывается обмотка НН.

Составляется исходная схема замещения нулевой последовательности.

В схеме (рис. 5.13) $x_c = 0$ и все нейтрали заземлены.

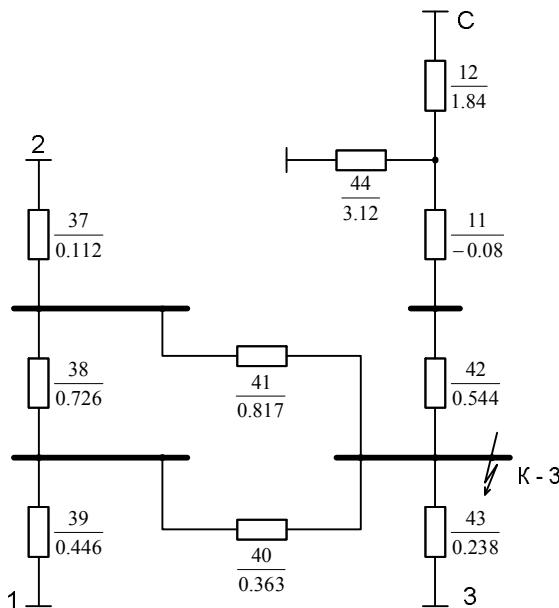


Рис. 5.13. Схема замещения нулевой последовательности

Если на станции № 1 нейтраль одного трансформатора не заземлена ($P1'$ — разомкнут), то схема изменит свой вид (рис. 5.14).

Определяются параметры элементов схемы замещения (рис. 5.13).

Трансформаторы:

$$x_{37} = x_2 0,85 = 0,131 \cdot 0,85 = 0,112,$$

$$x_{39} = x_4 0,85 = 0,525 \cdot 0,85 = 0,446,$$

$$x_{43} = x_9 0,85 = 0,28 \cdot 0,85 = 0,238.$$

Линии:

$$x_{38} = x_{y\vartheta 0} L \frac{S_\delta}{U_{ncp}^2} = 1,2 \cdot 4 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,726, \quad x_{40} = 1,2 \cdot 2 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,363,$$

$$x_{41} = 1,2 \cdot 4,5 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,817, \quad x_{42} = 1,2 \cdot 3 \cdot \frac{2000}{115^2} = 0,544,$$

где $x_{y\vartheta 0} = 3x_{y\vartheta 1} = 3 \cdot 0,4 = 1,2$.

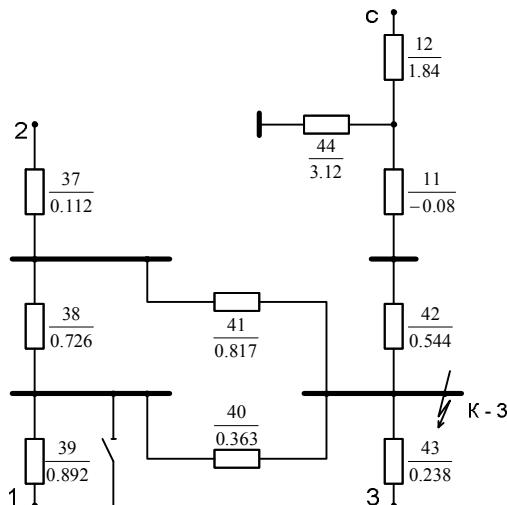
Расчет (рис. 5.15):

$$x_{45} = x_{11} + \frac{x_{12}x_{44}}{x_{12} + x_{44}} = -0,08 + \frac{1,84 \cdot 3,12}{1,84 + 3,12} = 1,077,$$

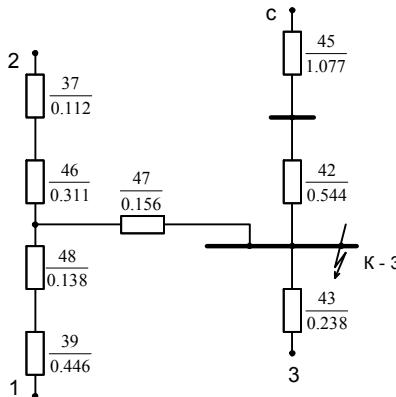
$$x_{46} = \frac{x_{38}x_{41}}{x_{38} + x_{40} + x_{41}} = \frac{0,726 \cdot 0,817}{0,726 + 0,363 + 0,817} = 0,311,$$

$$x_{47} = 0,156,$$

$$x_{48} = 0,138.$$



Puc. 5.14



Puc. 5.15

Расчет (рис. 5.16):

$$x_{49} = x_{37} + x_{46} = 0,112 + 0,311 = 0,423,$$

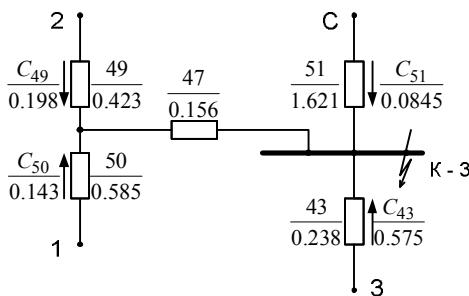
$$x_{50} = x_{48} + x_{39} = 0,138 + 0,446 = 0,585,$$

$$x_{51} = x_{45} + x_{42} = 1,077 + 0,544 = 1,621.$$

Расчет (рис. 5.17):

$$x_{52} = \frac{x_{49}x_{50}}{x_{49} + x_{50}} = \frac{0,423 \cdot 0,585}{0,423 + 0,585} = 0,245,$$

$$x_{53} = \frac{x_{51}x_{43}}{x_{51} + x_{43}} = \frac{1,621 \cdot 0,238}{1,621 + 0,238} = 0,208.$$



Puc. 5.16

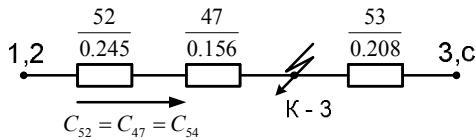


Рис. 5.17

Расчет (рис. 5.18):

$$x_{54} = x_{52} + x_{47} = 0,245 + 0,156 = 0,401.$$

Расчет (рис. 5.19):

$$x_{0\Sigma} = \frac{x_{54}x_{53}}{x_{54} + x_{53}} = \frac{0,401 \cdot 0,208}{0,401 + 0,208} = 0,137.$$

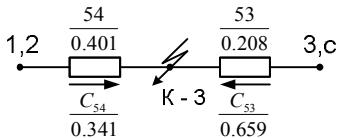


Рис. 5.18

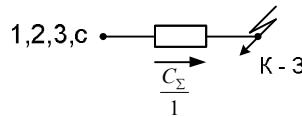


Рис. 5.19

Коэффициенты распределения от единичного тока для нулевой последовательности.

Расчет (рис. 5.18—5.16):

$$c_{53} = \frac{x_{0\Sigma}}{x_{53}} = \frac{0,137}{0,208} = 0,659, \quad c_{54} = \frac{x_{0\Sigma}}{x_{54}} = \frac{0,137}{0,401} = 0,341.$$

$$c_{51} = \frac{x_{53}}{x_{51}} c_{53} = \frac{0,208}{1,621} \cdot 0,659 = 0,0845,$$

$$c_{43} = \frac{x_{53}}{x_{43}} c_{53} = \frac{0,208}{0,238} \cdot 0,659 = 0,575,$$

$$c_{49} = \frac{x_{52}}{x_{49}} c_{54} = \frac{0,245}{0,423} \cdot 0,341 = 0,198,$$

$$c_{50} = \frac{x_{52}}{x_{50}} c_{54} = \frac{0,245}{0,585} \cdot 0,341 = 0,143.$$

Выполняется проверка

$$c_{51} + c_{43} + c_{49} + c_{50} = 0,0845 + 0,575 \cdot 0,198 + 0,143 = 1.$$

Определяются взаимные сопротивления нулевой последовательности для станций и системы (рис. 5.20):

$$x_{0c} = \frac{x_{0\Sigma}}{c_{51}} = \frac{0,137}{0,0845} = 1,621, \quad x_{01} = \frac{x_{0\Sigma}}{c_{50}} = \frac{0,137}{0,143} = 0,958,$$

$$x_{02} = \frac{x_{0\Sigma}}{c_{49}} = \frac{0,137}{0,198} = 0,692, \quad x_{03} = \frac{x_{0\Sigma}}{c_{43}} = \frac{0,137}{0,575} = 0,238.$$

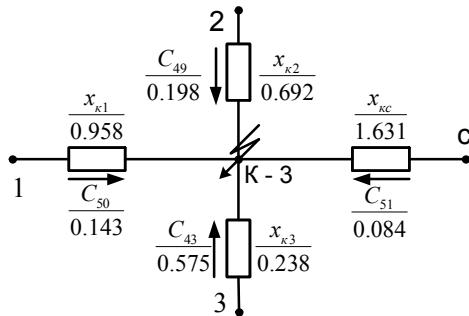


Рис. 5.20. Разделение источников для нулевой последовательности

5.5.2. Определение значений симметричных составляющих и полных фазных величин в точке КЗ

Определяем значения симметричных составляющих токов и напряжений в месте КЗ и их полные фазные величины для начального момента времени.

Для двухфазного КЗ на землю:

Дополнительное сопротивление

$$x_{\Delta}^{(1.1)} = \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = \frac{0,283 \cdot 0,137}{0,283 + 0,137} = 0,092.$$

Значение коэффициента:

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,283 \cdot 0,137}{(0,283 + 0,137)^2}} = 1,53.$$

Ток прямой последовательности в месте К3:

$$I_{\kappa 1}^{(1,1)} = \frac{E''_{\Sigma}}{x_{\Sigma} + x_{\Delta}^{(1,1)}} = \frac{1,1}{0,264 + 0,092} = 3,089.$$

Токи обратной и нулевой последовательностей определяются согласно табл. 5.1:

$$I_{\kappa 2}^{(1,1)} = -I_{\kappa 1}^{(1,1)} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = -3,089 \cdot \frac{0,137}{0,283 + 0,137} = -1,006,$$

$$I_{\kappa 0}^{(1,1)} = -I_{\kappa 1}^{(1,1)} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = -3,089 \cdot \frac{0,283}{0,283 + 0,137} = -2,083.$$

Модуль полного тока в месте К3:

$$I_{\kappa}^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_{\kappa 1}^{(1,1)} I_{\delta} = 1,53 \cdot 3,089 \cdot 10,041 = 47,45 \text{ кА.}$$

Ток в земле: $I_3^{(1,1)} = 3I_{0\Sigma}^{(1,1)} = 3 \cdot 2,083 \cdot 10,041 = 62,75 \text{ кА.}$

Напряжения отдельных последовательностей в месте К3:

$$U_{\kappa 1}^{(1,1)} = x_{\Delta}^{(1,1)} I_{\kappa 1}^{(1,1)} = 0,092 \cdot 3,089 = 0,285 \sqrt{b^2 - 4ac},$$

$$U_{\kappa 2}^{(1,1)} = -I_{\kappa 2}^{(1,1)} x_{2\Sigma} = -(-1,006) \cdot 0,283 = 0,285,$$

$$U_{\kappa 0}^{(1,1)} = -I_{\kappa 0}^{(1,1)} x_{0\Sigma} = -(-2,083) \cdot 0,137 = 0,285.$$

В именованных единицах $U_{\kappa}^{(1,1)} = U_{\kappa 1}^{(1,1)} \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3}} = 0,285 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = 18,92 \text{ кВ.}$

Полные фазные величины:

$$U_{\kappa A}^{(1,1)} = U_{\kappa 1}^{(1,1)} + U_{\kappa 2}^{(1,1)} + U_{\kappa 0}^{(1,1)} = 18,92 + 18,92 + 18,92 = 56,76 \text{ кВ};$$

$$U_{\kappa B}^{(1,1)} = a^2 U_{\kappa 1}^{(1,1)} + a U_{\kappa 2}^{(1,1)} + U_{\kappa 0}^{(1,1)} = 0;$$

$$U_{\kappa C}^{(1,1)} = a U_{\kappa 1}^{(1,1)} + a^2 U_{\kappa 2}^{(1,1)} + U_{\kappa 0}^{(1,1)} = 0.$$

Для однофазного КЗ:

Дополнительное сопротивление

$$x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} = 0,283 + 0,137 = 0,42.$$

Значение коэффициента $m^{(1)} = 3$.

Ток прямой последовательности в месте КЗ:

$$I_{\kappa 1}^{(1)} = \frac{E''_{\Sigma}}{x_{\Sigma} + x_{\Delta}^{(1)}} = \frac{1,1}{0,264 + 0,42} = 1,608.$$

Токи обратной и нулевой последовательностей определяются согласно таблице 5.1:

$$I_{\kappa 2}^{(1)} = I_{\kappa 1}^{(1)} = 1,608, \quad I_{\kappa 0}^{(1)} = I_{\kappa 1}^{(1)} = 1,608.$$

Модуль полного тока в месте КЗ равен току в земле:

$$I_{\kappa}^{(1)} = m^{(1)} I_{\kappa 1}^{(1)} I_{\delta} = 3 \cdot 1,608 \cdot 10,041 = 48,44 \text{ кА.}$$

$$I_{\delta}^{(1)} = 3 I_{0\Sigma}^{(1)} = 3 \cdot 1,608 \cdot 10,041 = 48,44 \text{ кА.}$$

Напряжения отдельных последовательностей в месте КЗ:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = x_{\Delta}^{(1)} I_{\kappa 1}^{(1)} = 0,42 \cdot 1,608 = 0,675,$$

$$U_{\kappa 2}^{(1)} = -I_{\kappa 1}^{(1)} x_{2\Sigma} = -1,608 \cdot 0,283 = -0,455,$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = -I_{\kappa 1}^{(1)} x_{0\Sigma} = -1,608 \cdot 0,137 = -0,22.$$

В именованных единицах:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3}} = 0,675 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = 44,82 \text{ кВ,}$$

$$U_{\kappa 2}^{(1)} = U_{\kappa 2}^{(1)} \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3}} = -0,455 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = -30,21 \text{ кВ,}$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = U_{\kappa 0}^{(1)} \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3}} = -0,22 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = -14,61 \text{ кВ.}$$

Полные фазные величины:

$$U_{\kappa A}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} + U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(1)} = 44,82 - 30,21 - 14,61 = 0;$$

$$U_{\kappa B}^{(1)} = a^2 U_{\kappa 1}^{(1)} + a U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(1)} = e^{j240} 44,82 - e^{j120} 30,21 - 14,61 = 68,6e^{j251,4} \text{ кВ};$$

$$U_{\kappa C}^{(1)} = a U_{\kappa 1}^{(1)} + a^2 U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(1)} = e^{j120} 44,82 - e^{j240} 30,21 - 14,61 = 68,6e^{j108,6} \text{ кВ}.$$

Для двухфазного КЗ:

$$\text{Дополнительное сопротивление } x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma} = 0,283.$$

$$\text{Значение коэффициента } m^{(2)} = \sqrt{3}.$$

Ток прямой последовательности в месте КЗ

$$I_{\kappa 1}^{(2)} = \frac{E''_{\Sigma}}{x_{\Sigma} + x_{\Delta}^{(2)}} = \frac{1,1}{0,264 + 0,283} = 2,01.$$

Токи отдельных последовательностей определяются согласно табл. 5.1:

$$I_{\kappa 2}^{(2)} = -I_{\kappa 1}^{(2)} = -2,01, I_{\kappa 0}^{(2)} = 0.$$

Модуль полного тока в месте КЗ:

$$I_{\kappa}^{(2)} = m^{(2)} I_{\kappa 1}^{(2)} I_{\delta} = \sqrt{3} \cdot 2,01 \cdot 10,041 = 34,96 \text{ кА}.$$

Напряжения отдельных последовательностей в месте КЗ:

$$U_{\kappa 1}^{(2)} = x_{\Delta}^{(2)} I_{\kappa 1}^{(2)} = 0,283 \cdot 2,01 = 0,569,$$

$$U_{\kappa 2}^{(2)} = -I_{\kappa 2}^{(2)} x_{2\Sigma} = -(-2,01) \cdot 0,283 = 0,569, U_{\kappa 0}^{(2)} = 0.$$

В именованных единицах:

$$U_{\kappa 1(2)}^{(2)} = U_{\kappa 2(2)}^{(2)} = U_{\kappa 1}^{(2)} \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3}} = 0,569 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = 37,78 \text{ кВ};$$

$$U_{\kappa A}^{(2)} = U_{\kappa 1}^{(2)} + U_{\kappa 2}^{(2)} = 2U_{\kappa 1}^{(2)} = 2 \cdot 37,78 = 75,56 \text{ кВ};$$

$$U_{\kappa B}^{(2)} = U_{\kappa C}^{(2)} = a^2 U_{\kappa 1}^{(2)} + a U_{\kappa 2}^{(2)} = (a^2 + a) U_{\kappa 1}^{(2)} = -37,78 \text{ кВ}.$$

Полученные в результате расчета фазные значения симметричных составляющих токов напряжений в месте КЗ используются для построения в масштабе векторных диаграмм (рис. 5.6—5.8).

5.5.3. Определение остаточных напряжений при несимметричном КЗ

Остаточные напряжения определяются по рекомендациям раздела 5.2 для точек К4 и К5 при коротком замыкании в точке КЗ расчетного варианта по отдельным последовательностям с последующим векторным суммированием для нахождения полных величин. Остаточные напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей определяются по формулам (5.7), (5.8), (5.9).

Для однофазного КЗ фазные напряжения отдельных последовательностей:

Точка К4:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = U_{K1}^{(1)} + I_{cl}^{(1)} x_{10} = 0,675 + 0,131 \cdot 0,181 = 0,7;$$

где: $I_{cl}^{(1)} = \frac{U_c}{x_{cK}^{(1)}} = \frac{1}{7,62} = 0,131$ при

$$x_{KC}^{(1)} = \frac{x_{1\Sigma} + \Delta x^{(1)}}{c_{16}} = \frac{0,264 + 0,42}{0,0898} = 7,62.$$

Напряжение прямой последовательности больше, чем в точке КЗ.

$$U_{\kappa 2}^{(1)} = -I_{K2}^{(1)} c_{16_2} x_{55} = -1,608 \cdot 0,096 \cdot 2,76 = -0,426;$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = -I_{K0}^{(1)} c_{51} x_{45} = -1,608 \cdot 0,084 \cdot 1,077 = -0,145.$$

Напряжения обратной и нулевой последовательностей меньше, чем в точке КЗ.

Фазные значения отдельных последовательностей в именованных единицах:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3}} = 0,7 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = 46,5 \text{ кВ},$$

$$U_{\kappa 2}^{(1)} = -0,426 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = -28,3 \text{ kB},$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = -0,145 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} = -9,6 \text{ kB}.$$

Полные фазные величины:

$$U_{\kappa A}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} + U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(1)} = 46,5 - 28,3 - 9,6 = 8,6 \text{ kB};$$

$$U_{\kappa B}^{(1)} = a^2 U_{\kappa 1}^{(1)} + a U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(n)} = e^{j240} 46,5 - e^{j120} 28,3 - 9,6 = 67,5 e^{j253,9} \text{ kB};$$

$$U_{\kappa C}^{(1)} = a U_{\kappa 1}^{(1)} + a^2 U_{\kappa 2}^{(1)} + U_{\kappa 0}^{(1)} = e^{j120} 46,5 - e^{j240} 28,3 - 9,6 = 67,5 e^{j106,1} \text{ kB}.$$

Точка K5:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = E_1'' - I_{cm11}^{(1)} \dot{x}_5 / 2 = 1,114 - 0,27 \cdot 1,615 / 2 = 0,896;$$

$$\text{где приближенно: } I_{cm11}^{(1)} = I_{K1}^{(1)} c_{23} = 1,608 \cdot 0,168 = 0,27$$

$$U_{\kappa 2}^{(1)} = -I_{K2}^{(1)} c_{33} \dot{x}_{27} / 2 = -1,608 \cdot 0,162 \cdot 1,972 / 2 = -0,257;$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = 0.$$

Фазные значения в именованных единицах:

$$U_{\kappa 1}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3}} = 0,896 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 5,43 \text{ kB}, \quad U_{\kappa 2}^{(1)} = -0,257 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = -1,56 \text{ kB},$$

$$U_{\kappa 0}^{(1)} = 0.$$

Полные величины:

При трансформации отдельных последовательностей в точке K5 необходимо учитывать группу соединения обмоток трансформатора согласно разделу 5.3.

$$U_{\kappa A}^{(1)} = e^{j30} U_{\kappa 1}^{(1)} + e^{-j30} U_{\kappa 2}^{(1)} = e^{j30} 5,43 - e^{-j30} 1,56 = 4,84 e^{-j46,2} \text{ kB};$$

$$U_{\kappa B}^{(1)} = a^2 e^{j30} U_{\kappa 1}^{(1)} + a e^{-j30} U_{\kappa 2}^{(1)} = U_{\kappa 1}^{(1)} + U_{\kappa 2}^{(1)} = 6,99 \text{ kB};$$

$$U_{\kappa C}^{(1)} = a e^{j30} U_{\kappa 1}^{(1)} + a^2 e^{-j30} U_{\kappa 2}^{(1)} = e^{j120} e^{j30} 5,43 - e^{j240} e^{-j30} 1,56 = 4,84 e^{-j313,8} \text{ kB}$$

По полученным значениям симметричных составляющих строятся в масштабе векторные диаграммы для точек К4 и К5.

5.5.4. Расчет тока несимметричного КЗ для $t = 0,1\text{ с}$ и $t = 3\text{ с}$

Периодическая составляющая тока несимметричного КЗ для момента времени $t = 0,1\text{ с}$ и $t = 3\text{ с}$ находится методом типовых кривых (прил. Г).

Номинальные токи станций в о.е. найдены ранее: $I_{h1} = 0,235$, $I_{h2} = 0,706$, $I_{h3} = 0,3$. Расчет производится для прямой последовательности тока КЗ отдельно для каждого источника. Определяется аналитически начальный ток прямой последовательности каждого источника $I''_{k1i}^{(n)}$ по формуле $I''_{k1i}^{(n)} = \frac{E_i}{x_{Ki}}$, где

$$x_{Ki}^{(1)} = \frac{x_{1\Sigma} + \Delta x^{(1)}}{c_i}, \quad c_i \text{ — коэффициент распределения соответствующего источника для схемы прямой последовательности. Ниже приведен пример расчета однофазного КЗ.}$$

Определяются взаимные сопротивления станций и системы

$$\begin{aligned} x_{K1}^{(1)} &= \frac{x_{1\Sigma} + \Delta x^{(1)}}{c_{23}} = \frac{0,264 + 0,42}{0,168} = 4,07, & x_{K2}^{(1)} &= \frac{0,684}{0,453} = 1,51, \\ x_{K3}^{(1)} &= \frac{0,684}{0,289} = 2,37, & x_{KC}^{(1)} &= \frac{0,684}{0,0898} = 7,62. \end{aligned}$$

Начальный ток прямой последовательности отдельного источника

$$\begin{aligned} I''_{k11}^{(1)} &= \frac{E_1''}{x_{K1}^{(1)}} = \frac{1,114}{4,07} = 0,274; & I''_{k12}^{(1)} &= \frac{1,117}{1,51} = 0,49; \\ I''_{k13}^{(1)} &= \frac{1,098}{2,37} = 0,463; & I''_{k1C}^{(1)} &= \frac{1,0}{7,62} = 0,131. \end{aligned}$$

При электрической удаленности точки КЗ от источника α отношение γ для момента времени определяется по типовым кривым:

$$\alpha_1 = \frac{I_{K11}^{(1)}}{I_{n1}} = \frac{0,274}{0,235} = 1,17, \quad \alpha_2 = \frac{0,49}{0,706} = 0,69, \quad \alpha_3 = \frac{0,463}{0,3} = 1,54.$$

Для момента времени $t = 0,1$ с: $\gamma_1 = 0,97$, $\gamma_2 = 0,97$, $\gamma_3 = 0,96$.

Для момента времени $t = 3$ с: $\gamma_1 = 1,0$, $\gamma_2 = 1,0$, $\gamma_3 = 0,95$.

Периодическая составляющая прямой последовательности тока однофазного КЗ для момента времени $t = 0,1$ с

$$I_{K11(0,1)}^{(1)} = I_{K11}^{(1)}\gamma_1 = 0,274 \cdot 0,97 = 0,266;$$

$$I_{K12(0,1)}^{(1)} = 0,49 \cdot 0,97 = 0,475;$$

$$I_{K13(0,1)}^{(1)} = 0,463 \cdot 0,96 = 0,444;$$

$$I_{K1C(0,1)}^{(1)} = I_{K1C(3)}^{(1)} = I_{K1C}''^{(1)} = 0,131.$$

Суммарный ток однофазного короткого замыкания для $t = 0,1$ с

$$I_{\Sigma(0,1)*}^{(1)} = 3I_{K1(0,1)}^{(1)} = 3(0,266 + 0,475 + 0,444 + 0,131) = 3,95,$$

$$I_{\Sigma(0,1)}^{(1)} = I_{\Sigma(0,1)*}^{(1)}I_{\delta} = 3,95 \cdot 10,041 = 41,1 \text{ кА}.$$

Периодическая составляющая прямой последовательности тока однофазного КЗ для момента времени $t = 3$ с

$$I_{K11(3)}^{(1)} = I_{K11}^{(1)}\gamma_1 = 0,274 \cdot 1,0 = 0,274;$$

$$I_{K12(3)}^{(1)} = 0,49 \cdot 1,0 = 0,49;$$

$$I_{K13(3)}^{(1)} = 0,463 \cdot 0,95 = 0,44.$$

Суммарный ток однофазного короткого замыкания для $t = 3$ с

$$I_{\Sigma(3)*}^{(1)} = 3I_{K1(3)}^{(1)} = 3(0,274 + 0,49 + 0,44 + 0,131) = 4,0;$$

$$I_{\Sigma(3)}^{(1)} = I_{\Sigma(0,1)*}^{(1)}I_{\delta} = 4,0 \cdot 10,041 = 41,64 \text{ кА}.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. — 152 с.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для электрических и энергетических вузов и факультетов / С.А. Ульянов. — М.: Энергия, 1970. — 520 с.
3. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / Ю.А. Куликов. — Новосибирск: Изд-во НГТУ; М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. — 283 с.
4. Справочник по проектированию электроснабжения промышленных предприятий / под ред. Ю.Г. Барыбина и др. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 576 с.
5. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей: учеб. пособие для студентов вузов / В.М. Блок [и др.]; под ред. В.М. Блок. — М.: Высш. школа, 1981. — 304 с.
6. ГОСТ 2.105-95. Общие требования к текстовым документам. — М.: Госкомитет по стандартам, 1996. — 85 с.
7. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. Т. 1. / К.С. Демирчян [и др.] — 4-е изд. — СПб.: Питер, 2004 — 463 с.
8. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: учеб. пособие / И.П. Крючков [и др.]; под ред. И.П. Крючкова, В.А. Старшинова. — М.: Изд. Центр «Академия», 2005. — 416 с.

Приложение A

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ по курсу «переходные процессы в электроэнергетических системах»

Шифр: _____

Выдано студенту_____ группа_____

1. Для заданной схемы электрической сети выполнить расчет трехфазного короткого замыкания (КЗ) в заданной точке без учета влияния других станций и системы. Определить:

1.1. Периодическую составляющую начального тока КЗ от каждого генератора станции № 1 и суммарный ток трехфазного КЗ.

1.2. Периодическую составляющую результирующего начального тока трехфазного КЗ и тока для времени $t = 0,5$ с методами:

- типовых кривых;
- расчетных кривых;
- спрямленных характеристик.

1.3. Ударный ток короткого замыкания.

1.4. Действующее значение тока КЗ за первый период и тепловой импульс.

1.5. Мощность короткого замыкания в начальный момент и для времени $t = 0,5$ с.

2. Оценить погрешность расчета практическими методами.

Примечания:

1. Расчеты произвести в системе относительных единиц при приближенном приведении. Для аналитического расчета начального момента расчет произвести также в именованных единицах.

2. Принять:

- мощность нагрузки равной суммарной мощности трансформаторов;
- сопротивление нагрузки $x_H = 1,2$;
- предельный ток возбуждения $I_{fnp} = E_{qnp} = 3$;

— синхронное сопротивление турбогенератора $x_d = 1, 2$.

Срок сдачи_____

Задание выдал _____

«____» ____ 20 ____ г.

Приложение Б

ЗАДАНИЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ «переходные процессы в электроэнергетических системах»

Шифр: _____

Выдано студенту _____ группа _____

1. Для заданной схемы электрической сети выполнить расчет трехфазного короткого замыкания (КЗ) в одной точке.

Определить:

1.1. долевое участие каждой электрической станции и системы в начальном токе КЗ с использованием коэффициентов распределения;

1.2. периодическую составляющую начального тока КЗ от каждого источника и суммарный ток трехфазного КЗ;

1.3. периодическую составляющую тока трехфазного КЗ для времени $t = 0,1$ с и $t = 3$ с методом типовых кривых;

1.4. ударный ток КЗ;

1.5. отключаемую мощность КЗ;

1.6. тепловой импульс;

1.7. остаточное напряжение на шинах СН автотрансформатора и в точке К5.

2. Составить и преобразовать схемы замещения отдельных последовательностей и выполнить расчет заданного вида несимметричного КЗ.

Определить:

- 2.1. значения симметричных составляющих токов и напряжений в месте КЗ и их полные фазные величины для начального момента времени;
- 2.2. значения симметричных составляющих и полные фазные величины напряжений на шинах СН автотрансформатора и в точке К5 для начального момента времени;
- 2.3. периодическую составляющую тока несимметричного КЗ для времени $t = 0,1$ с и $t = 3$ с методом типовых кривых;
3. Построить векторные диаграммы токов и напряжений в месте КЗ, а также векторные диаграммы напряжений на шинах СН автотрансформатора и в точке К5.

Примечания:

1. Расчет произвести в относительных единицах при приближенном приведении.
2. Считать, что до КЗ генераторы работали в номинальном режиме. Сопротивление нагрузки не учитывать.
3. При определении ударного тока использовать эквивалентную постоянную времени.

Срок сдачи_____

Задание выдал «_____» 20____ г.

Приложение В

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

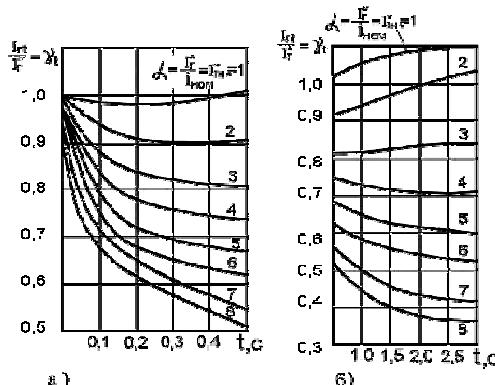
1. Какие основные допущения приняты при решении задач, поставленных в работе?
2. Особенности использованного расчетного метода, различия между расчетными методами.
3. Какие основные допущения положены в основу понятия об источнике «бесконечной мощности»?
4. Отличия в приближенном и точном приведении.
5. Как определить ток КЗ от системы бесконечной мощности?

6. Каковы пределы изменения ударного коэффициента в индуктивно-активной цепи?
7. Каковы пределы изменения отношения i_y / I_y ?
8. Вывести формулу $x_{*\delta} = x_{*_n} \cdot \frac{S_\delta}{S_n}$.
9. Вывести формулу $x_{*c\delta} = x_{*_n} \cdot \frac{S_\delta}{S_c''}$.
10. Вывести формулу $x_{*\lambda\delta} = x_{y\delta} \cdot \ell \cdot \frac{S_\delta}{U_n^2}$.
11. Указать допущения, положенные в основу методов: типовых кривых, расчетных кривых, спрямленных характеристик.
12. В чем выражается условность термина «действующее значение тока КЗ за первый период его изменения»?
13. В чем выражается условность понятия «начальное значение тока КЗ»?
14. В чем выражается условность понятия «мощность короткого замыкания»?
15. Сформулировать правило эквивалентности прямой последовательности.
16. Особенности расчета несимметричных КЗ практическими методами расчета.
17. Изменится ли напряжение прямой последовательности в месте КЗ при несимметричных КЗ на землю при разземлении нейтралей части трансформаторов?
18. В каких случаях ток установившегося КЗ может превышать величину тока в начальный момент?
19. Может ли ток несимметричного КЗ вида $K^{(n)}$ в начальный момент превышать ток трехфазного КЗ?
20. Может ли ток несимметричного КЗ вида $K^{(n)}$ в установившемся режиме превышать ток трехфазного КЗ?
21. Записать соотношение между отдельными составляющими токов и напряжений при несимметричном КЗ вида $K^{(n)}$.
22. Записать соотношение между полным током КЗ и прямой последовательностью тока для КЗ вида $K^{(n)}$.

23. Как влияют тросы на индуктивное сопротивление нулевой последовательности?
24. Как изменится сопротивление нулевой последовательности двухцепной линии при отключении одной цепи?
25. Как определяется дополнительная реактивность $x_{\Delta}^{(n)}$ при КЗ вида $K^{(n)}$?
26. Что такое комплексная схема замещения?
27. Записать операторы поворота a , a^2 в алгебраической форме.
28. Изобразить векторную диаграмму токов (напряжений) в месте КЗ при несимметричном повреждении вида $K^{(n)}$.
29. Что такое «эквивалентная постоянная времени»?
30. Как определить остаточное напряжение в произвольной точке системы при симметричном КЗ?
31. Как определить остаточное напряжение в произвольной точке системы при несимметричном КЗ?

Приложение Г

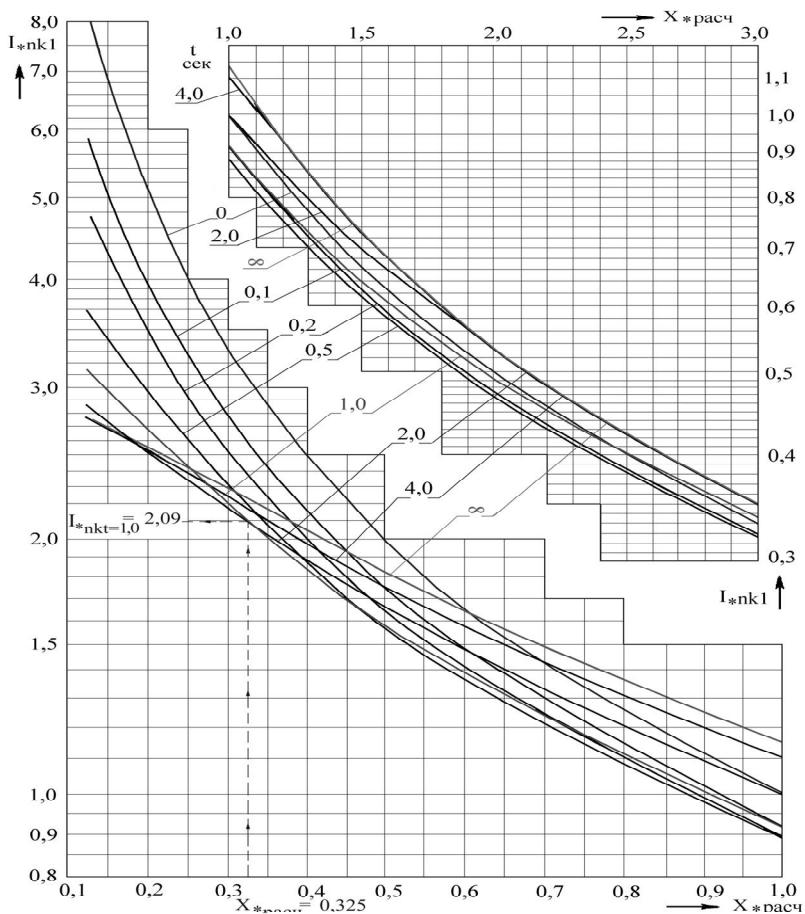
ТИПОВЫЕ КРИВЫЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ



- а) в генераторе при времени до 0,5 с;
б) в генераторе при времени от 0,5 до 3 с

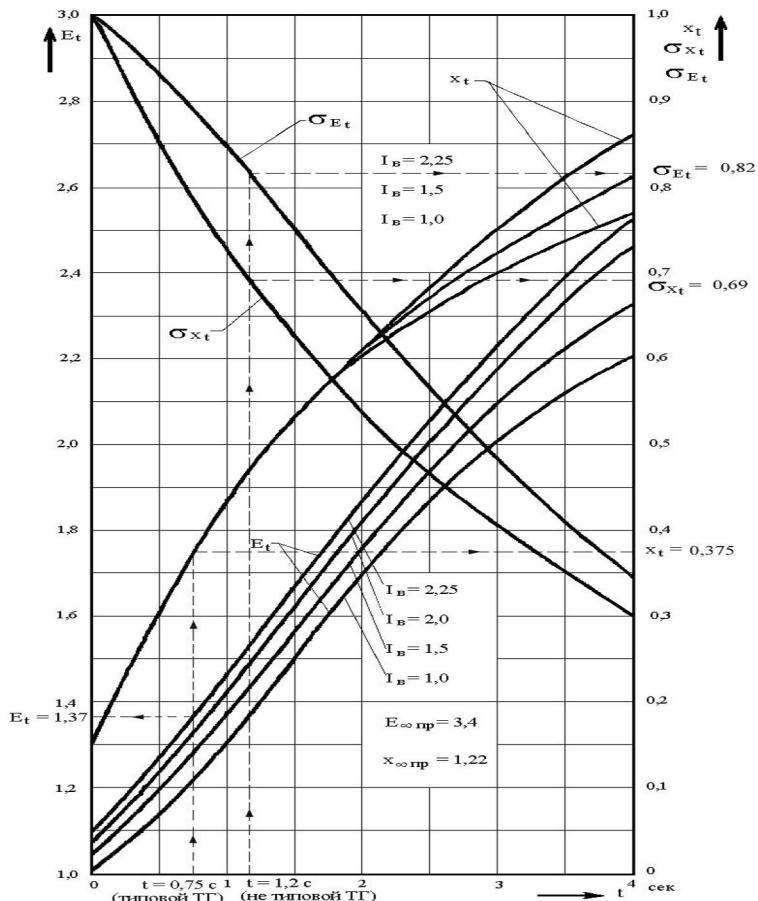
Приложение Д

РАСЧЕТНЫЕ КРИВЫЕ ДЛЯ ТИПОВОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА С АРВ



Приложение E

КРИВЫЕ МЕТОДА СПРЯМЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК



Типовой турбогенератор с АРВ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. Цели и задачи расчетов	4
2. Исходные данные	5
3. Расчет параметров элементов, составление и преобразование схем замещения	10
3.1. Общие положения	10
3.2. Приведение в относительных единицах.....	11
3.3. Параметры элементов для отдельных последовательностей.....	12
3.4. Схемы замещения отдельных последовательностей	15
3.5. Нахождение взаимных сопротивлений	17
4. Расчет трехфазного короткого замыкания.....	21
4.1. Общие положения.....	21
4.2. Расчет периодической слагающей тока короткого замыкания.....	21
4.3. Определение ударного тока, действующего значения тока КЗ за первый период и мощности короткого замыкания	25
4.4. Определение остаточных напряжений в узлах системы.....	27
4.5. Пример расчета домашнего задания практическими методами	27
4.6. Пример расчета симметричного трехфазного КЗ курсовой работы.....	39
4.6.1. <i>Расчет параметров и преобразования схемы замещения</i>	39
4.6.2. <i>Определение долевого участия источников в суммарном начальном токе КЗ и расчет взаимных сопротивлений</i>	46
4.6.3. <i>Определение периодической составляющей тока</i>	47
4.6.4. <i>Определение ударного тока КЗ</i>	49
4.6.5. <i>Определение действующего значения тока КЗ за первый период, теплового импульса и мощности КЗ</i>	51

<i>4.6.6. Расчет остаточных напряжений при трехфазном КЗ</i>	51
5. Расчет несимметричного короткого замыкания	52
5.1. Общие положения	52
5.2. Определение остаточных напряжений при несимметричном КЗ.....	56
5.3. Определение фазных величин и построение векторных диаграмм	58
5.4. Особенности расчета несимметричных КЗ методом типовых кривых	60
5.5. Пример расчета несимметричного КЗ в курсовой работе.....	61
5.5.1. Составление и преобразование схем отдельных последовательностей.....	61
5.5.2. Определение значений симметричных составляющих и полных фазных величин в точке КЗ	69
5.5.3. Определение остаточных напряжений при несимметричном КЗ.....	73
5.5.4. Расчет тока несимметричного КЗ для $t = 0,1\text{ с}$ и $t = 3\text{ с}$	75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	77
Приложение А	
Домашнее задание по курсу «переходные процессы в электроэнергетических системах».....	78
Приложение Б	
Задание к курсовой работе «переходные процессы в электроэнергетических системах»	79
Приложение В	
Вопросы для самопроверки	80
Приложение Г	
Типовые кривые токов короткого замыкания генераторов	82
Приложение Д	
Расчетные кривые для типового турбогенератора с АРВ	83
Приложение Е	
Кривые метода спрямленных характеристик	84

Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 28.12.2012

Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов

Гарнитура Times. Усл. печ. листов 5,5

Тираж 300 экз. Заказ 1387

Отпечатано в Издательстве

Нижневартовского государственного гуманитарного университета

628615, Тюменская область, г.Нижневартовск, ул.Дзержинского, 11

Тел./факс: (3466) 43-75-73, E-mail: izdatelstvo@nggu.ru