

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Тобольский индустриальный институт (филиал)
Кафедра электроэнергетики

РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к курсовой работе по дисциплине
«Переходные процессы »
для обучающихся направления подготовки 13.03.02 –
Электроэнергетика и электротехника, всех форм обучения

Составитель ***Е.Н. Леонов,***
кандидат технических наук, старший преподаватель

Тюмень
ТИУ
2018

Расчёт токов короткого замыкания в электрических системах: Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Переходные процессы для обучающихся направления подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника, всех форм обучения / сост. Е.Н. Леонов; Тюменский индустриальный университет. – 1-е изд. – Тюмень: Издательский центр БИК, ТИУ, 2018. – 32 с.

Аннотация

Методические указания по дисциплине «Переходные процессы» предназначены для обучающихся направления подготовки 13.03.02

«Электроэнергетика и электротехника». Данная дисциплина изучается в двух семестрах, курсовая работа выполняется в первом семестре изучения дисциплины.

Изложены основные положения расчётов токов короткого замыкания в электрических системах напряжением выше 1000 В. Рассмотрены вопросы составления и преобразования схем замещения и применения практических методов расчёта симметричных коротких замыканий. Приведены задания, исходные данные и примеры выполнения курсовой работы по теме «Расчёт токов короткого замыкания в электрических системах»

Приведённые методика и материалы также могут использоваться для расчётов токов короткого замыкания при выполнении выпускной квалификационной работы.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАСЧЁТОВ

Данные методические указания предназначены для обучающихся, изучающих дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах» и «Электромагнитные и электромеханические переходные процессы». Расчёт режимов коротких замыканий (КЗ) в электроустановках напряжением выше 1000 В производится для выбора схем электрических соединений, выбора и проверки оборудования и проводников, расчётов релейной защиты и других целей, обозначенных например в [1].

Курсовая работа призвана подготовить обучающихся к выполнению выпускной квалификационной работы и привить им навыки инженерного подхода к решению задач. Качество и степень проработки заданий позволят судить о квалификации обучающихся по избранному им направлению подготовки.

Курсовая работа представляет собой задание, включающее в себя вопросы расчёта симметричного режима в одной точке заданной схемы.

При выполнении работы должны быть определены следующие расчётные величины:

- долевое участие каждой электрической станции и системы в общем токе трёхфазного КЗ в начальный момент времени при трёхфазном КЗ в заданной точке;
- начальное значение тока периодической составляющей трёхфазного КЗ от каждого источника и суммарный ток трёхфазного 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.

Текст задания к курсовой работе приведен в приложении А.

Примерный объем курсовой работы 15 – 20 страниц.

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

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Курсовая работа выполняется в соответствии с индивидуальным заданием, выдаваемым каждому обучающемуся. Бланк задания приведён в приложении А. Исходные данные берутся в соответствии с шифром, состоящим из комбинации буквенных и цифровых обозначений.

Для задания, например:

К5.1.2.

Сочетание буквы и цифры (в примере это К5) указывает номер точки, в которой производится расчёт трёхфазного короткого замыкания (по рис. 2.1).

Вторая цифра (в примере это 1) обозначает вариант в табл. 2.1 и определяет характеристики линий электропередачи.

Третья цифра (в примере это 2) определяет параметры генераторов, трансформаторов, автотрансформаторов, реакторов, нагрузок и системы. Цифра указывает вариант в табл. 2.2.

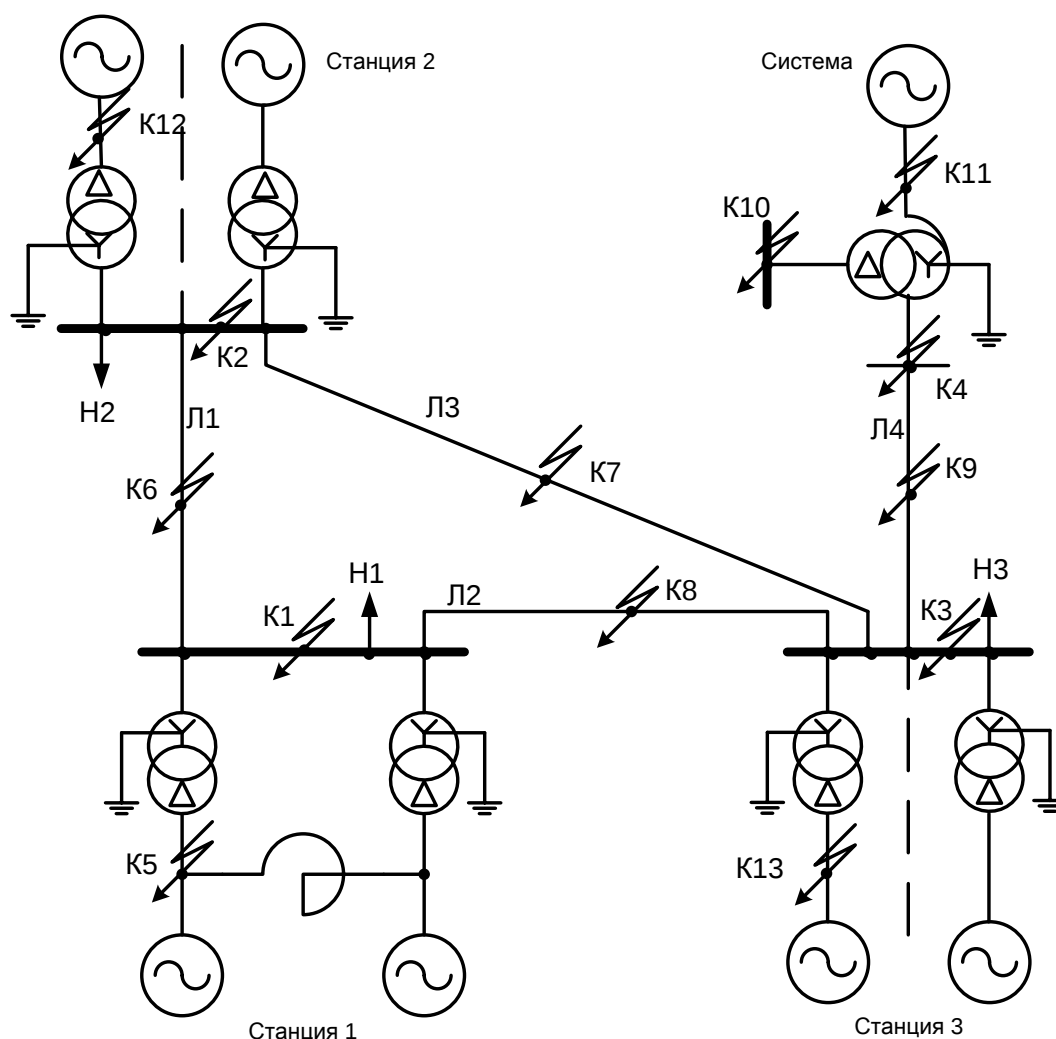


Рис. 2.1. Схема электрических соединений системы № 1

Точки короткого замыкания К6, К7, К8, К9 находятся посредине соответствующих линий.

Таблица 2.1

Характеристики линий электропередачи

Вариант	Длина линий (км)				Удельные параметры (Ом/км)	
	Л1	Л2	Л3	Л4	$x_{y\partial 1}$	$r_{y\partial}$
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

Таблица 2.2

Технические данные элементов электрической системы

Вар.	Станция 1													
	Турбогенераторы с АРВ					Трансформаторы					Реакторы			
	P_H , МВт	$\cos\varphi_H$	U_H , кВ	x_d''	$\frac{x}{r}$	S_H , МВ·А	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
1	30	0,8	6,3	0,143	20	40	115	6,3	10,5	20	10	2	0,14	40
2	60	0,8	10,5	0,146	40	80	121	10,5	10,5	20	10	2	0,2	40
3	100	0,85	10,5	0,183	100	125	121	10,5	10,5	30	10	3	0,25	50
4	120	0,85	10,5	0,214	100	125	121	10,5	10,5	30	10	3	0,35	50
5	200	0,85	15,75	0,19	120	200	121	15,7	10,5	30	10	2	0,4	40
6	120	0,85	10,5	0,214	100	125	121	10,5	10,5	30	10	3	0,14	50
7	100	0,85	10,5	0,183	100	125	242	10,5	11	30	10	4	0,2	80
8	60	0,8	6,3	0,146	40	80	242	6,3	11	20	10	4	0,25	80
9	30	0,8	10,5	0,143	20	32	330	10,5	11	20	10	2	0,35	40
10	63	0,8	10,5	0,2	40	80	121	10,5	10,5	20	10	2	0,4	40

Продолжение табл. 2.2

Вар.	Станция 2										
	Турбогенераторы с АРВ						Трансформаторы				
	п	P_H , МВт	$\cos\varphi_H$	U_H , кВ	x_d''	$\frac{x}{r}$	S_H , МВ·А	U_B , кВ	U_H , кВ	U_K , %	$\frac{x}{r}$
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	6	100	0,85	10,5	0,183	100	125	121	10,5	10,5	30
2	4	120	0,85	10,5	0,214	100	125	121	10,5	10,5	30
3	5	165	0,85	18	0,213	100	200	121	18	10,5	30
4	3	200	0,85	15,75	0,19	120	200	121	15,75	10,5	30
5	4	300	0,85	20	0,195	130	400	121	20	10,5	40
6	4	320	0,85	20	0,173	140	400	121	20	10,5	40
7	3	500	0,85	20	0,25	150	630	242	20	11	50
8	6	320	0,85	20	0,173	140	400	242	20	11	40
9	6	300	0,85	20	0,195	130	400	347	20	11	40
10	8	200	0,85	15,75	0,19	120	200	121	15,75	10,5	30

Продолжение табл. 2.2

Вар.	Станция 3										
	Турбогенераторы с АРВ						Трансформаторы				
	п	P_H , МВт	$\cos\varphi_H$	U_H , кВ	x_d''	$\frac{x}{r}$	S_H , МВ·А	U_B , кВ	U_H , кВ	U_K , %	$\frac{x}{r}$
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1	6	20	0,85	10,5	0,225	40	40	121	10,5	10,5	20
2	8	30	0,8	10,5	0,197	40	40	121	10,5	10,5	20
3	8	40	0,8	15,75	0,232	40	63	115	15,75	10,5	20
4	5	72	0,8	13,8	0,24	40	80	121	13,8	10,5	20
5	6	90	0,9	16,5	0,19	50	125	121	16,5	10,5	30
6	4	100	0,85	13,8	0,22	50	125	121	13,8	10,5	30
7	8	171	0,9	15,75	0,27	50	200	242	15,75	11	30
8	5	260	0,85	15,75	0,268	50	400	242	15,75	11	40
9	4	300	0,85	15,75	0,34	60	400	347	15,75	11	40
10	6	500	0,85	15,75	0,3	60	630	121	15,75	10,5	50

Вар.	Автотрансформатор на подстанции								Система
	S_H , МВ·А	U_B , кВ	U_C , кВ	U_H , кВ	U_{KBH} , %	U_{KCH} , %	U_{KBC} , %	$\frac{x}{r}$	S' , МВ·А
	41	42	43	44	45	46	47	48	49
1	63	230	121	11	35	22	11	20	1500
2	125	230	121	11	31	19	11	30	2000
3	200	230	121	11	32	20	11	30	2500
4	250	230	121	11	32	20	11	30	2300
5	125	330	115	11	35	22	10	30	3500
6	200	330	121	11	32	22	10	30	4000
7	500	500	230	11	35	22	11	50	4500
8	800	500	230	11	23	13	9	60	5000
9	500	500	330	11	67	61	9,5	50	∞
10	200	230	121	11	32	20	11	30	∞

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

При расчётах считается, 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.

3. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ, СОСТАВЛЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

3.1. Общие положения

Для расчёта 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 $U_{осн} = U_6$. 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 $S_{\bar{o}}, U_{\bar{o}}$. Сопротивлениям, возникающим в результате преобразования, присваиваются последующие порядковые номера.

В соответствии с точностью практических методов расчёта рекомендуется использовать приближённое 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 расчёта в относительных единицах вводятся базисные величины $S_{\bar{o}}$ (МВ·А), $U_{\bar{o}}$ (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 $U_{осн} = U_{\bar{o}}$):

точное приведение

приближённое приведение

$$E_{*\bar{o}} = \frac{E}{U_{\bar{o}}} \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n); \quad E_{*\bar{o}} = \frac{E}{U_n}; \quad (3.1)$$

$$x_{*\bar{o}} = x \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2} \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n)^2; \quad x_{*\bar{o}} = x \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{н ср}^2}. \quad (3.2)$$

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

точное приведение

приближённое приведение

$$E_{*\bar{o}} = E_{*н} \cdot \frac{U_n}{U_{\bar{o}}} \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n); \quad E_{*\bar{o}} = E_{*н}; \quad (3.3)$$

$$x_{*\bar{o}} = x_{*н} \cdot \left(\frac{U_n}{U_{\bar{o}}} \right)^2 \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_n} (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n)^2; \quad x_{*\bar{o}} = x_{*н} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_n}. \quad (3.4)$$

В выражениях (3.1–3.4) U_n 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

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

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

$$x_r = x_d'' \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H}, \quad (3.5)$$

где x_d'' – сверхпереходное сопротивление в относительных единицах;
 S_H – номинальная мощность генератора.

Система. Для системы конечной и бесконечной мощности при известном значении S''

$$x_c = 1,0 \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S''}, \quad (3.6)$$

для системы бесконечной мощности $x_c = 0$.

Трансформаторы. Для трансформаторов сопротивления рассеивания прямой и обратной последовательностей

$$x_{1m} = x_{2m} = \frac{U_{\kappa\%}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H}, \quad (3.7)$$

где $U_{\kappa\%}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора;

S_H – номинальная мощность трансформатора.

Автотрансформатор. Сопротивления автотрансформатора высокого, среднего и низкого напряжения

$$x_B = \frac{0,5 \cdot \mathcal{U}_{\kappa BC} + U_{\kappa BH} - U_{\kappa CH}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H}, \quad (3.8)$$

$$x_C = \frac{0,5 \cdot \mathcal{U}_{\kappa BC} + U_{\kappa CH} - U_{\kappa BH}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H}, \quad (3.9)$$

$$x_H = \frac{0,5 \cdot \mathcal{U}_{\kappa BH} + U_{\kappa CH} - U_{\kappa BC}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H}. \quad (3.8)$$

Токоограничивающий реактор. Для реакторов

$$x_p = x_{p(O_M)} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{н\ уст}^2}, \quad (3.9)$$

где $x_{p(O_M)}$ – сопротивление реактора в именованных единицах;

$U_{н\ уст}$ – среднее номинальное напряжение ступени, где установлен реактор.

Воздушные линии. Для воздушных линий сопротивление

$$x_{1.l} = x_{2.l} = x_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_n^2}, \quad (3.10)$$

где $x_{уд}$ – удельное сопротивление линии;

l – длина линии;

U_n – среднее номинальное напряжение.

Формулы (3.5) – (3.12) учитывают, что параметры всех элементов приближённо приведены на базисную ступень напряжения и переведены в относительные единицы при базисных условиях.

3.4. Схема замещения

Схема замещения – это электрическая схема, в которой все магнитные связи заменяются электрическими, источники питания представляются ЭДС и сопротивлениями, а элементы системы электроснабжения, связывающие источники питания с точкой КЗ – сопротивлениями [1].

Схема замещения составляется в соответствии с заданной схемой электрических соединений или расчётной схемой.

Схема замещения может быть составлена с использованием именованных или относительных единиц измерения параметров ее элементов. Если составляется схема замещения в именованных единицах, то недостаточно объединить схемы замещения отдельных элементов расчетной схемы в общую схему. Необходимо сопротивления участков сети с разными номинальными напряжениями привести к одному напряжению, называемому базисным.

Использование метода расчётных кривых не требует определения ЭДС и учёта нагрузок, поскольку они учитываются самим методом. Генераторы при этом вводятся в схему замещения прямой последовательности своими сверхпереходными сопротивлениями x_d'' для любого расчётного момента времени. В методе спрямленных характеристик для каждого момента времени требуется новая схема замещения и обязателен учет нагрузок.

Аналитический расчёт 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

$$E_0'' = \sqrt{U_0 \cdot \cos \varphi_0^2 + U_0 \cdot \sin \varphi_0 + I_0 \cdot x_d''^2} \quad (3.13)$$

либо

$$E_0'' = U_0 + I_0 \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi_0, \quad (3.14)$$

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 $E_{0\sigma}'' = E_{0н}''$. 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 обобщённой нагрузки в начальный момент КЗ не требуется [2].

Схема должна быть преобразована до одного результирующего сопротивления относительно точки КЗ $x_{1\Sigma}$ 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 равноудалённых источников до точки КЗ. Все расчёты ведутся для трёх значащих цифр.

3.5. Нахождение взаимных сопротивлений

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

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.

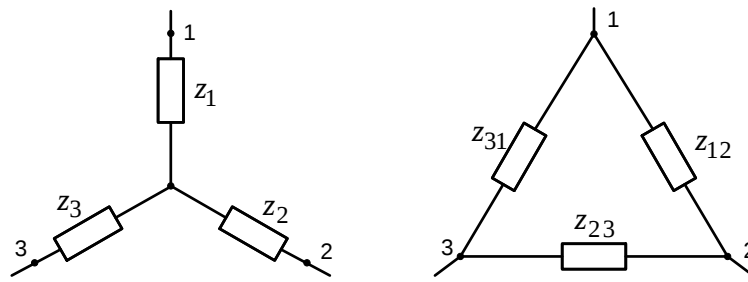


Рис. 3.2. Преобразование трёхлучевой звезды в треугольник

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

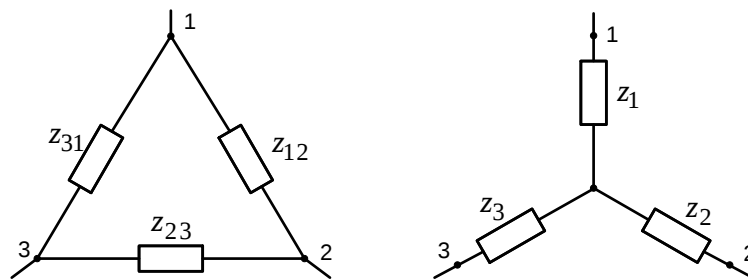


Рис. 3.3. Преобразование треугольника в звезду

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

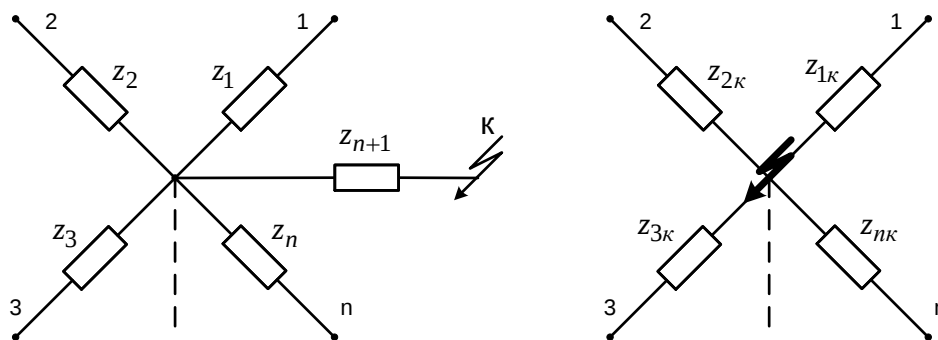


Рис. 3.4. Преобразование многолучевой звезды

$$z_{1k} = z_1 \cdot z_{n+1} \cdot \sum \frac{1}{z_i}, \quad z_{2k} = z_2 \cdot z_{n+1} \cdot \sum \frac{1}{z_i}, \dots, z_{nk} = z_n \cdot z_{n+1} \cdot \sum \frac{1}{z_i},$$

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

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 вносит определённую 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 развёртыванием схемы от результирующего сопротивления до исходной схемы. Ниже показан способ нахождения коэффициентов распределения для случаев параллельного и последовательного сложения сопротивлений.

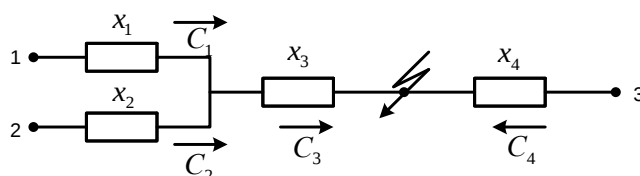
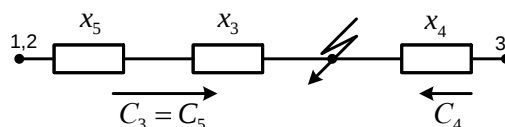
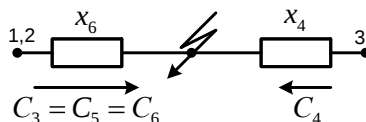


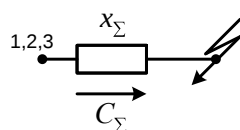
Рис. 3.5. Исходная схема



$$x_5 = x_1 // x_2;$$



$$x_6 = x_5 + x_3;$$



$$x_\Sigma = x_6 // x_4.$$

Рис. 3.6. Этапы преобразования исходной схемы

Расчёт коэффициентов распределения

$$C_\Sigma = 1; \quad C_4 = \frac{x_\Sigma}{x_4}; \quad C_6 = C_3 = C_5 = \frac{x_\Sigma}{x_6};$$

$$C_1 = \frac{x_5}{x_1} \cdot C_3; \quad C_2 = \frac{x_5}{x_2} \cdot C_3;$$

Проверка:

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

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

$$\sum_i C_i = 0 \quad \text{— для узла;}$$

$$\sum_j (C_j \cdot x_j) = 0 \quad \text{— для контура.}$$

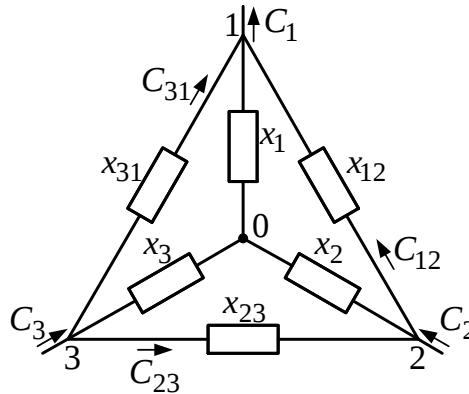


Рис. 3.7. Исходная схема

Для принятого на рис. 3.7 направления коэффициентов распределения

узел 1 $C_{31} + C_{12} - C_1 = 0$,

узел 2 $C_{23} - C_{12} + C_2 = 0$,

узел 3 $-C_{31} - C_{23} + C_3 = 0$;

контур 1201 — $-C_{12}x_{12} + C_2x_2 + C_1x_1 = 0$,

контур 2302 — $-C_{23}x_{23} + C_3x_3 - C_2x_2 = 0$,

контур 3103 — $C_{31}x_{31} - C_1x_1 - C_3x_3 = 0$.

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

4. РАСЧЁТ ТРЁХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

4.1. Общие положения

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

$$I_{n\kappa t\Sigma} = \sum_m I_{n\kappa t m} . \quad (4.1)$$

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

4.2. Расчёт 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

$$I''_{n\kappa m} = \frac{E''_{0m}}{x_{\kappa m}} \cdot I_{\bar{o}} , \quad (4.2)$$

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

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

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

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

где $E''_{0\Sigma} = \frac{\sum E_i \cdot Y_i}{\sum Y_i}$ – эквивалентная ЭДС;

$Y_i = \frac{1}{x_{\kappa i}}$ – проводимость i -ой ветви.

Метод типовых кривых. Для нахождения тока для произвольного момента времени (в курсовой работе для времени $t = 0,1$ с и $t = \infty$ ($\infty = 3$ с)) совместно с аналитическим расчётом начального тока используются типовые кривые изменения тока (рис. 4.1). 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 $I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_H}$ для выделенной группы генераторов, и их

отношение $\alpha = \frac{I''_{n\kappa\Gamma}}{I_H}$. 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

$\gamma = \frac{I_{n\kappa\Gamma t}}{I''_{n\kappa\Gamma}}$ и находят необходимую величину периодической слагающей

тока КЗ генератора $I_{n\kappa\Gamma t} = \gamma \cdot I''_{n\kappa\Gamma}$, и в месте КЗ

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

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.

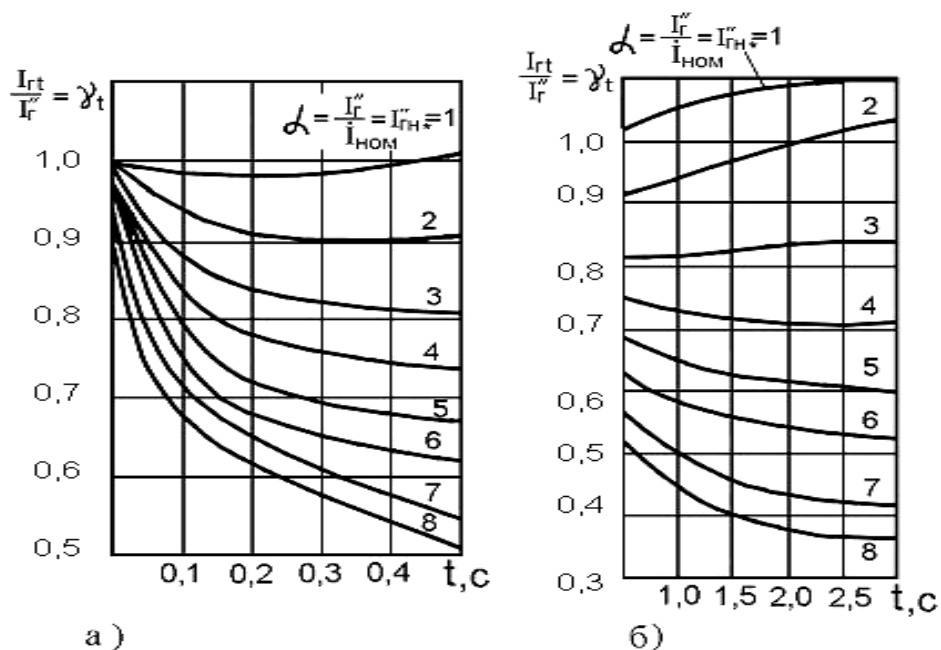


Рис. 4.1. Типовые кривые токов короткого замыкания генераторов
а) при времени до 0,5 с; б) при времени от 0,5 до 3 с

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 $t = 0$

$$i_y = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{нк}, \quad (4.5)$$

где $k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_\vartheta}}$.

Эквивалентная постоянная времени T_ϑ [1, 2] при расчёте в относительных единицах определяется как

$$T_{\vartheta(o.e)} = \frac{x_\Sigma}{r_\Sigma}, \quad (4.6)$$

а при расчёте в именованных единицах –

$$T_{\vartheta(c)} = \frac{x_\Sigma}{\omega \cdot r_\Sigma}, \quad (4.7)$$

где x_Σ – результирующее реактивное сопротивление схемы относительно точки КЗ, определенное без учёта активных сопротивлений;

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

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 314$ – угловая частота (рад/с).

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

$$I_y = I''_{нк} \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2}. \quad (4.8)$$

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

$$B_k = I''_{нк}^2 \cdot (t_{отк} + T_\vartheta), \quad (4.9)$$

где $t_{отк} = 0,1$ с – время отключения КЗ.

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

$$S_{кт} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{нкт}. \quad (4.10)$$

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. 4.2, определяется по формуле

$$U_{ост} = E - I_i x_i. \quad (4.11)$$

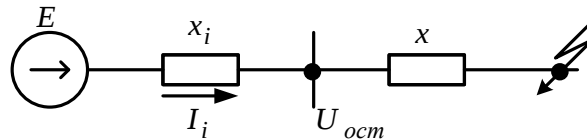


Рис. 4.2. Расчётная схема

5. ПРИМЕР РАСЧЁТА СИММЕТРИЧНОГО ТРЁХФАЗНОГО КЗ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Все расчёты будут приводиться согласно следующим исходным данным:

- линии электропередачи – табл. 2.1 (вариант 3);
- станции 1, 2, 3 – табл. 2.2 (вариант 5);
- автотрансформатор – табл. 2.2 (вариант 2).

5.1. Расчёт параметров и преобразования схемы замещения

Расчёт произведём в относительных единицах без учёта сопротивлений нагрузки. В качестве базисной мощности принимается мощность системы

$$S_{\delta} = S'' = 2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

За базисное напряжение принимается среднее номинальное напряжение сети в точке КЗ:

$$U_{\delta} = U_{cp.n} = 115 \text{ кВ}.$$

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 (рисунок 5.1) по схеме электрических соединений системы (рисунок 2.1).

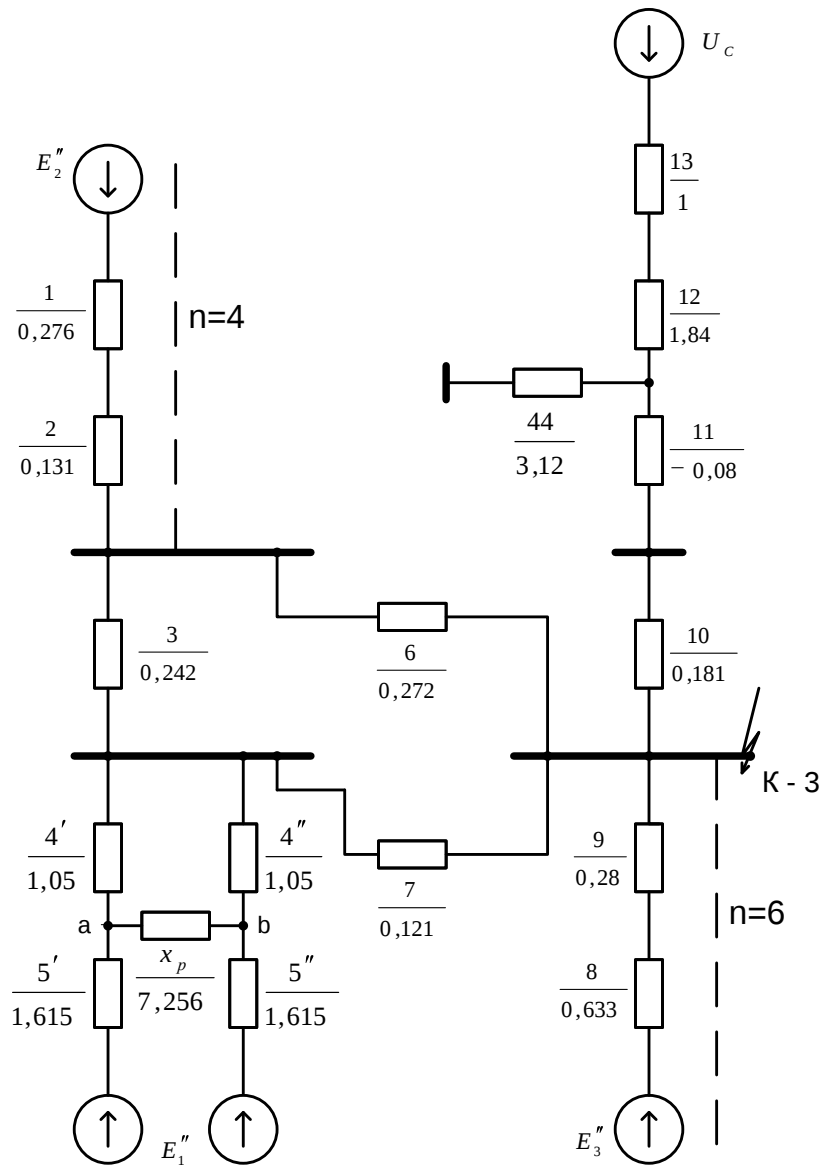


Рис. 5.1. Схема замещения

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

Сопротивления генераторов определяются по формуле (3.5):

$$x_1 = \frac{\left(0,195 \cdot \frac{2000 \cdot 0,85}{300} \right)}{4} = 0,276 ,$$

$$x_{5'} = x_{5''} = 1,615 , \quad x_8 = 0,633 .$$

Сопротивления трансформаторов – по формуле (3.7):

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

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

Сопротивление реактора – по формуле (3.9):

$$x_p = 0,4 \cdot \frac{2000}{10,5^2} = 7,256 .$$

Сопротивления линий – по формуле (3.10):

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

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

Сопротивления автотрансформатора – по формулам (3.8):

$$x_{11} = \frac{0,5 \cdot \overbrace{1 + 19 - 31}^{\sim}}{100} \cdot \frac{2000}{125} = -0,08 ,$$

$$x_{12} = \frac{0,5 \cdot \overbrace{1 + 31 - 19}^{\sim}}{100} \cdot \frac{2000}{125} = 1,84 ,$$

$$x_{44} = \frac{0,5 \cdot \overbrace{1 + 19 - 11}^{\sim}}{100} \cdot \frac{2000}{125} = 3,12 .$$

Сопротивление системы по формуле (3.6):

$$x_{13} = \frac{S_{\bar{6}}}{S''} = \frac{2000}{2000} = 1 .$$

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

Теперь сворачиваем схему замещения прямой последовательности.

Расчёт (рис. 5.2):

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

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

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

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

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

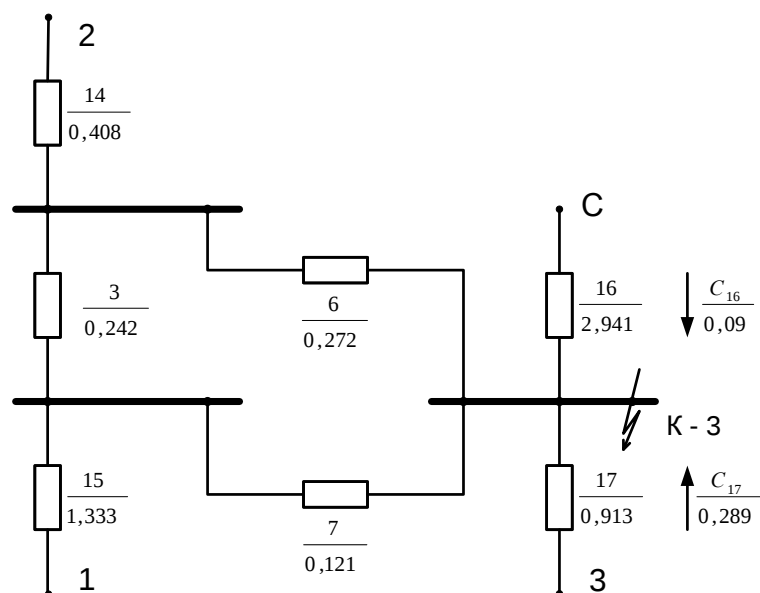


Рис. 5.2. Первый этап преобразования схемы замещения

Расчёт (рис. 5.3):

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

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

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

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

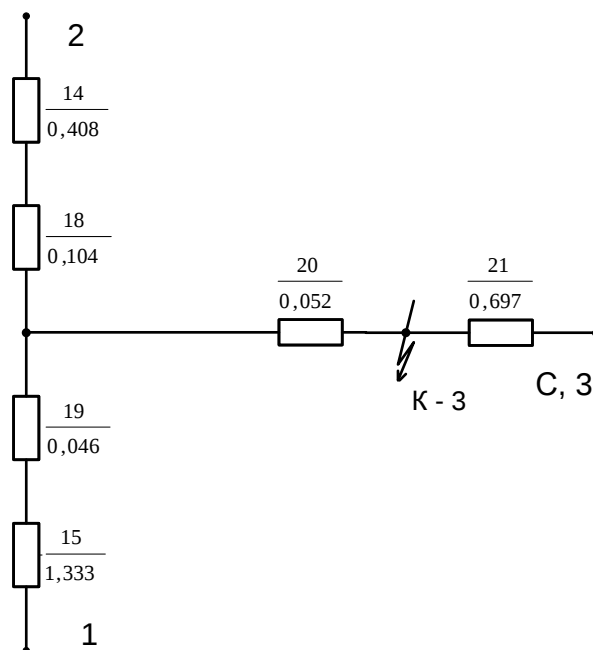


Рис. 5.3. Второй этап преобразования схемы замещения

Расчёт (рис. 5.4):

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

$$x_{23} = x_{19} + x_{15} = 0,046 + 1,333 = 1,379 .$$

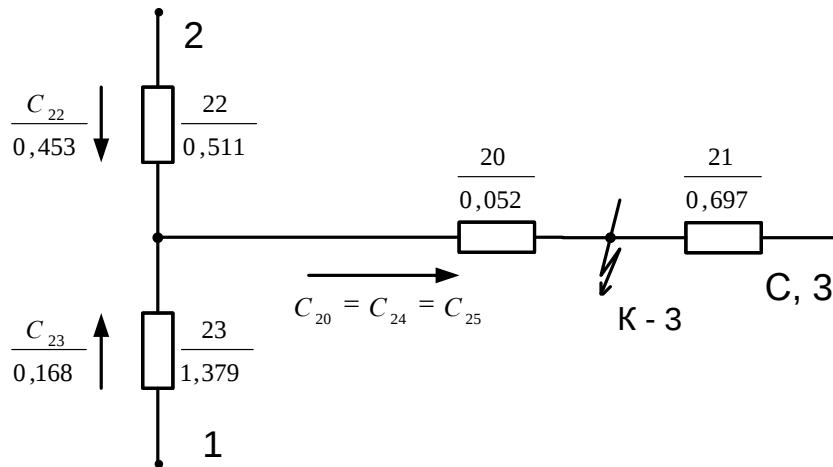


Рис. 5.4. Третий этап преобразования схемы замещения
Расчёт (рис. 5.5):

$$x_{24} = \frac{x_{22} x_{23}}{x_{22} + x_{23}} = \frac{0,511 \cdot 1,379}{0,511 + 1,379} = 0,373 .$$

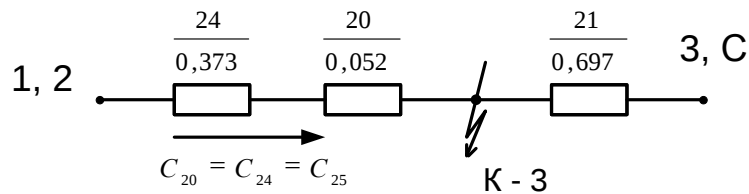


Рис. 5.5. Четвёртый этап преобразования схемы замещения

Расчёт (рис. 5.6):

$$x_{25} = x_{20} + x_{24} = 0,373 + 0,052 = 0,425 .$$

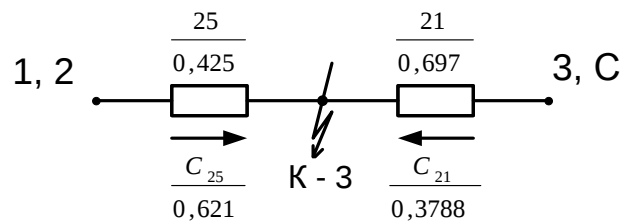


Рис. 5.6. Пятый этап преобразования схемы замещения

Расчёт (рис. 5.7):

$$x_{\Sigma} = \frac{x_{25} x_{21}}{x_{25} + x_{21}} = \frac{0,425 \cdot 0,697}{0,425 + 0,697} = 0,264 .$$

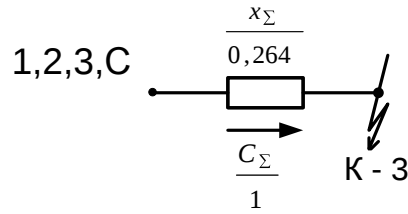


Рис. 5.7 – Результирующее сопротивление (Шестой этап преобразования схемы замещения)

5.2. Определение долевого участия источников в суммарном начальном токе КЗ и расчёт взаимных сопротивлений

Необходимо определить доленое участие каждой электрической станции и системы в начальном токе КЗ с использованием коэффициентов распределения. Коэффициенты распределения находятся разворачиванием схемы от результирующего сопротивления до исходной схемы. Единичный ток распределяется обратнопропорционально сопротивлению.

Расчёт (рис. 5.6):

$$c_{21} = \frac{x_{\Sigma}}{x_{21}} = \frac{0,264}{0,697} = 0,379, \quad c_{25} = \frac{x_{\Sigma}}{x_{25}} = \frac{0,264}{0,425} = 0,621.$$

Расчёт (рис. 5.5, 5.4):

$$c_{20} = c_{24} = c_{25} = 0,621,$$

$$c_{22} = \frac{x_{24}}{x_{22}} c_{20} = \frac{0,373}{0,511} \cdot 0,621 = 0,453, \quad c_{23} = \frac{x_{24}}{x_{23}} c_{20} = \frac{0,373}{1,379} \cdot 0,621 = 0,168.$$

Расчёт (рис. 5.3, 5.2):

$$c_{16} = \frac{x_{21}}{x_{16}} \cdot c_{21} = \frac{0,697}{2,941} \cdot 0,379 = 0,0898,$$

$$c_{17} = \frac{x_{21}}{x_{17}} \cdot c_{21} = \frac{0,697}{0,913} \cdot 0,379 = 0,289.$$

Выполняется проверка:

$$c_{22} + c_{23} + c_{16} + c_{17} = 0,453 + 0,168 + 0,0898 + 0,289 = 1.$$

Определяются взаимные сопротивления станций и системы (рис. 5.8)

$$x_{\kappa C} = \frac{x_{\Sigma}}{c_{16}} = \frac{0,264}{0,0898} = 2,941,$$

$$x_{\kappa 1} = \frac{x_{\Sigma}}{c_{23}} = \frac{0,264}{0,168} = 1,57,$$

$$x_{\kappa 2} = \frac{x_{\Sigma}}{c_{22}} = \frac{0,264}{0,453} = 0,582,$$

$$x_{\kappa 3} = \frac{x_{\Sigma}}{c_{17}} = \frac{0,264}{0,289} = 0,913.$$

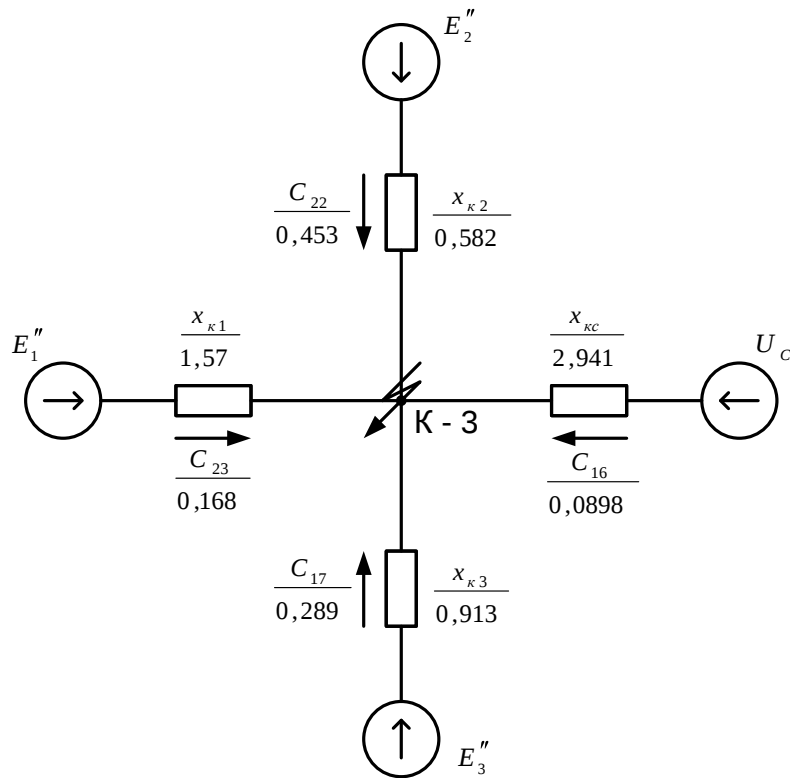


Рис. 5.8. Разделение источников

5.3. Определение периодической составляющей тока

Найдём ЭДС E_{*1}'' первой станции:

$$E_{\delta 1}'' = \sqrt{\left(U \cos \varphi + I_{* \delta}'' x_{d * \delta}'' \right)^2 + \left(U \sin \varphi + I_{* \delta}'' x_{d * \delta}'' \right)^2} = \sqrt{1 \cdot 0,85^2 + \left(0,53 + 0,235 \cdot 0,807 \right)^2} = 1,114 ,$$

$$I_{* \delta}'' = \frac{S_H}{S_{\delta}} = \frac{2 P_H}{S_{\delta} \cos \varphi} = \frac{2 \cdot 200}{2000 \cdot 0,85} = 0,235 ,$$

$$x_{d * \delta}'' = x_5 = 0,807 .$$

Так как при приближённом приведении $E_{* \delta}'' = E_{* H}''$, то ЭДС каждой системы можно определить по паспортным данным.

$$E_1'' = E_{1 \delta}'' = 1,114 ,$$

$$E_2'' = \sqrt{1 \cdot 0,85^2 + \left(0,53 + 1 \cdot 0,195 \right)^2} = 1,117 ,$$

$$E_3'' = 1,098 .$$

Токи отдельных источников в начальный момент времени

$$I_c'' = \frac{U_c}{x_{kc}} = \frac{1}{2,941} = 0,34 , \quad I_{cm1}'' = \frac{E_1''}{x_{k1}} = \frac{1,114}{1,57} = 0,71 ,$$

$$I_{cm2}'' = \frac{E_2''}{x_{k2}} = \frac{1,117}{0,582} = 1,919 , \quad I_{cm3}'' = \frac{E_3''}{x_{k3}} = \frac{1,098}{0,913} = 1,203 .$$

Суммарный ток трёхфазного короткого замыкания

$$I''_{\Sigma} = 0,34 + 0,71 + 1,919 + 1,203 = 4,17 .$$

В именованных единицах

$$I''_{\Sigma} = I''_{\Sigma} I_{\sigma} = 4,17 \cdot 10,041 = 41,87 \text{ кА}.$$

Эквивалентная ЭДС:

$$E''_{\Sigma} = \frac{\sum E_i \cdot Y_i}{\sum Y_i} = \frac{\frac{1,114}{1,57} + \frac{1,117}{0,582} + \frac{1,098}{0,913} + \frac{1}{2,941}}{\frac{1}{1,57} + \frac{1}{0,582} + \frac{1}{0,913} + \frac{1}{2,941}} = 1,1 .$$

Суммарный ток трёхфазного 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 трёхфазного КЗ для момента времени $t = 0,1 \text{ с}$ и $t = 3 \text{ с}$ находится методом типовых кривых.

Номинальные токи станций в о.е.

$$I_{н1} = \frac{n \cdot P_n}{\cos \varphi \cdot S_{\sigma}} = \frac{2 \cdot 200}{0,85 \cdot 2000} = 0,235 ,$$

$$I_{н2} = \frac{4 \cdot 300}{0,85 \cdot 2000} = 0,706 , \quad I_{н3} = \frac{6 \cdot 90}{0,9 \cdot 2000} = 0,3 .$$

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

$$\alpha_1 = \frac{I''_{cm1}}{I_{н1}} = \frac{0,71}{0,235} = 3,021 ,$$

$$\alpha_2 = \frac{I''_{cm2}}{I_{н2}} = \frac{1,919}{0,706} = 2,718 , \quad \alpha_3 = \frac{I''_{cm3}}{I_{н3}} = \frac{1,203}{0,3} = 4,01 .$$

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

Для момента времени $t = 3 \text{ с}$: $\gamma_1 = 0,84$, $\gamma_2 = 0,9$, $\gamma_3 = 0,71$.

Периодическая составляющая тока КЗ для момента времени $t = 0,1 \text{ с}$

$$I_{cm1(0,1)} = I''_{cm1} \cdot \gamma_1 = 0,71 \cdot 0,88 = 0,62 ,$$

$$I_{cm2(0,1)} = I''_{cm2} \cdot \gamma_2 = 1,919 \cdot 0,91 = 1,75 ,$$

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

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

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

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

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

$$I_{cm1(3)} = I''_{cm1} \gamma_1 = 0,71 \cdot 0,84 = 0,596 ,$$

$$I_{cm2(3)} = I''_{cm2} \gamma_2 = 1,919 \cdot 0,9 = 1,727 ,$$

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

Суммарный ток трёхфазного короткого замыкания

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

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

5.4. 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 $\frac{x}{r} = \frac{0,4}{0,075} = 5,33 ,$

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

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

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. 5.1 – 5.7):

$$\begin{aligned}
 r_{14} &= 0,0021 + 0,0033 = 0,0054 , \\
 r_{15} &= 0,0067 + 0,0175 = 0,0242 , \\
 r_{16} &= r_{0,034} + 0,0587 + 0 = 0,0927 , \\
 r_{17} &= 0,0127 + 0,0093 = 0,022 , \\
 r_{18} &= 0,019 , \\
 r_{19} &= 0,0087 , \\
 r_{20} &= 0,0098 , \\
 r_{21} &= \frac{0,0927 \cdot 0,022}{0,0927 + 0,022} = 0,0178 , \\
 r_{22} &= 0,0054 + 0,019 = 0,024 , \\
 r_{23} &= 0,0087 + 0,0242 = 0,0329 , \\
 r_{24} &= \frac{0,024 \cdot 0,0329}{0,024 + 0,0329} = 0,0139 , \\
 r_{25} &= 0,0098 + 0,0139 = 0,0237 , \\
 r_{\Sigma} &= \frac{r_{25} \cdot r_{21}}{r_{25} + r_{21}} = \frac{0,0237 \cdot 0,0178}{0,0237 + 0,0178} = 0,01 . \\
 k_y &= 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{\vartheta}}} .
 \end{aligned}$$

Если T_{ϑ} в относительных единицах, то

$$\begin{aligned}
 T_{\vartheta(o.e)} &= \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = \frac{0,264}{0,01} = 26,4 \text{ о.е.}, \\
 k_y &= 1 + e^{-\frac{0,01 \cdot \omega}{T_{\vartheta}}} = 1 + e^{-\frac{0,01 \cdot 314}{26,4}} = 1,89 .
 \end{aligned}$$

Если T_{ϑ} в именованных единицах, то

$$\begin{aligned}
 T_{\vartheta(c)} &= \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = \frac{0,264}{\omega \cdot 0,01} = \frac{0,264}{314 \cdot 0,01} = 0,084 \text{ с.}, \\
 k_y &= 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{\vartheta}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,084}} = 1,89 .
 \end{aligned}$$

Ударный ток определяется по формуле (4.5)

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

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

Действующее значение тока КЗ за первый период его изменения

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

Тепловой импульс тока КЗ

$$B_{\kappa} = I''_{\Sigma}^2 (t_{отк} + T_g) = 41,87^2 \cdot (0,1 + 0,084) = 322,57 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

Мощность в момент времени $t = 0.1 \text{ с}$ (время отключения КЗ)

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

5.6. Расчёт остаточных напряжений при трёхфазном 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

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

Остаточное напряжение в точке К5

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

В именованных единицах

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования [Текст] / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
2. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах [Текст] : учебник для электрических и энергетических вузов и факультетов / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
3. Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах [Текст] : учебное пособие. – М.: Изд-во «Омега-Л», 2013. – 384 с.
4. Справочник по проектированию электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / Под ред. Ю.Г. Барыбиин и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
5. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей [Текст] : учебное пособие для студентов вузов / В.М. Блок и др.; Под ред. В.М. Блок. – М.: Высшая школа, 1981. – 304 с.
6. ГОСТ 2.105-95. Общие требования к текстовым документам [Текст]. – Введ. 1996-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 28 с.
7. Теоретические основы электротехники [Текст] : учебник для вузов: В 3 т. / К.С. Демирчян и др. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2004 – Т.1. – 463с.
8. Расчёт коротких замыканий и выбор электрооборудования [Текст] : учебное пособие для студентов ВУЗов / И.П.Крючков и др; Под ред. И.П. Крючкова и В.А. Старшинова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 416 с.

ЗАДАНИЕ

к курсовой работе «Расчёт токов короткого замыкания в электрической системе в точке КХ.Х.Х»

Выдано студенту _____ группа _____

Для заданной электрической системы выполнить расчёт трёхфазного короткого замыкания (КЗ) в одной точке согласно варианту задания.

Определить:

- 1 долевое участие каждой электрической станции и системы в начальном токе КЗ с использованием коэффициентов распределения;
- 2 периодическую составляющую начального тока КЗ от каждого источника и суммарный ток трёхфазного КЗ;
- 3 периодическую составляющую тока трёхфазного КЗ для времени $t = 0,1$ с и $t = 3$ с методом типовых кривых;
- 4 ударный ток КЗ;
- 5 отключаемую мощность КЗ;
- 6 тепловой импульс;
- 7 остаточное напряжение на шинах СН автотрансформатора и в точке К5.

Примечания:

1. Расчёт 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 «____» _____ 20__ г.

Задание выдал

«____» _____ 20__ г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАСЧЁТОВ.....	3
2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	4
3. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ, СОСТАВЛЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ.....	7
3.1. Общие положения.....	7
3.2. Приведение в относительных единицах.....	8
3.3. Параметры элементов.....	9
3.4. Схема замещения.....	10
3.5. Нахождение взаимных сопротивлений.....	11
4. РАСЧЁТ ТРЁХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	15
4.1. Общие положения.....	15
4.2. Расчёт периодической слагающей тока короткого замыкания.....	15
4.3. Определение ударного тока, действующего значения тока КЗ за первый период и мощности короткого замыкания.....	17
4.4. Определение остаточных напряжений в узлах системы.....	18
5. ПРИМЕР РАСЧЁТА СИММЕТРИЧНОГО ТРЁХФАЗНОГО КЗ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	18
5.1. Расчёт параметров и преобразования схемы замещения.....	18
5.2. Определение долевого участия источников в суммарном начальном токе КЗ и расчёт взаимных сопротивлений.....	23
5.3. Определение периодической составляющей тока	24
5.4. Определение ударного тока КЗ.....	26
5.5. Определение действующего значения тока КЗ за первый период, теплового импульса и мощности КЗ.....	28
5.6. Расчёт остаточных напряжений при трёхфазном КЗ	28
Список использованных источников.....	29
Приложение А. Задание к курсовой работе.....	30

РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к курсовой работе по дисциплине
«Переходные процессы » для обучающихся направления
подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника, всех
форм обучения

Составитель:
ЛЕОНОВ Евгений Николаевич

В авторской редакции

Подписано в печать . .2018. Формат 60х90 1/16. Печ. л. 2. Тираж
30 экз. Заказ № .

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.