

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»
Кафедра электроснабжения промышленных предприятий

Е. Я. Абрамова

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рекомендовано к изданию Редакционно – издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по направлению подготовки 140400. 62 Электроэнергетика

Оренбург
2012

УДК 621.3

ББК 34.5 я7

А 16

Рецензент – доцент, канд. техн. наук А. Г. Никульченко

Абрамова, Е. Я.

А 16

Переходные процессы в электроэнергетических системах: методические указания / Е. Я. Абрамова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2012. – 66 с.

ISBN

В методических указаниях представлены основные методические материалы для расчетов токов короткого замыкания при выполнении курсовой работы по переходным процессам в электроэнергетических системах.

В указаниях приведены задания для курсовой работы. Даны примеры выполнения заданий.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по направлению 140400.62 Электроэнергетика, профиль подготовки электрические станции

ISBN

© Абрамова Е.Я., 2012

© ОГУ, 2012

Содержание

Введение.....	4
1 Задания на курсовую работу	5
2 Указания к выполнению курсовой работы.....	10
2.1 Задание № 1.....	10
2.2 Задание № 2.....	13
2.3 Задание №3.....	17
3 Примеры расчетов.....	24
3.1 Пример выполнения задания № 1.....	25
3.2 Пример выполнения задания № 2.....	35
3.3 Пример выполнения задания № 3.....	46
Список использованных источников.....	66

Введение

Расчет переходных процессов является составной частью всех электротехнических решений, связанных с выбором схем электроустановок, выбором и проверкой оборудования и т.д. Большая часть переходных процессов связана с короткими замыканиями. В методических указаниях два метода их расчета – метод эквивалентных э.д.с. и метод типовых кривых, предложенных ГОСТ Р 52735-2007 в качестве основных. В указаниях приводится методика выполнения этих расчетов, ссылки на теоретический материал, а также примеры расчетов.

Изложение материала в ПЗ должно быть кратким, логичным, последовательным. Все принимаемые решения должны быть обоснованными. В ПЗ должны быть приведены все необходимые расчеты, схемы, рисунки, графики, поясняющие содержание записки. Не следует включать в ПЗ общеизвестные теоретические положения. Большой объем числового материала следует сводить в таблицы. Оформление материала ПЗ должно соответствовать требованиям СТО 02069024 - 101 – 2010.

1 Задания на курсовую работу

Задание №1

Для электрической системы, принципиальная схема, которой приведена на рис.1.1, методом эквивалентных э.д.с. определить:

а) начальное значение периодической слагающей тока I_{nk0} при трёхфазном коротком замыкании в точке $K_i^{(3)}$;

б) начальное значение аperiodической слагающей тока i_{a0} при трёхфазном коротком замыкании в точке $K_i^{(3)}$;

в) ударный ток короткого замыкания, $i_y^{(3)}$, в той же точке.

Решение выполнить в именованных единицах с учётом действительных коэффициентов трансформации трансформаторов; вариант задания и номер точки трёхфазного короткого замыкания ($K_i^{(3)}$) указывается преподавателем; все данные о параметрах элементов электрической системы указаны в таблицах 1.1; 1.2, 1.3.

Задание №2

Для электрической системы, принципиальная схема которой приведена на рис.1.1., определить:

а) периодическую слагающую тока трехфазного к.з. в точке, указанной в предыдущем задании, для различных моментов времени методом типовых кривых;

б) построить график изменения периодической слагающей тока к.з. во времени, $I_{nk}^{(3)} = f(t)$.

Решение выполнить в относительных единицах по приближенной схеме замещения. Расчёт токов к.з. вести методом типовых кривых по индивидуальному изменению токов. Сравнить результаты расчетов 1-го и 2-го задания, сделать выводы.

Задание №3

Для схемы, показанной на рисунке 1.1., аналитическим путем определить:

а) начальное значение тока к.з. в указанной точке при всех несимметричных коротких замыканиях.

б) построить векторные диаграммы токов и напряжений для заданной точки короткого замыкания;

в) определить величины напряжений всех фаз при к.з.

Таблица 1.1 – Параметры генераторов и системы

№ варианта	G 1				G 2				Система		
	Номинальная мощность S_n , МВА	Номинальное напряжение U_n , кВ	Сверхпереходное сопротивление x_d , о.е.	$\cos \varphi$	Номинальная мощность S_n , МВА	Номинальное напряжение U_n , кВ	Сверхпереходное сопротивление x_d , о.е.	$\cos \varphi$	Номинальная мощность S_n , МВА	Сопротивление прямой последовательности, X_{1c}	Сопротивление прямой последовательности, X_{0c}
1	125,00	10,5	0,21	0,80	15,00	6,30	0,13	0,80	∞	0	14 Ом
2	68,75	10,5	0,13	0,80	117,50	10,50	0,16	0,85	2000	12 Ом	0,2 о.е
3	176,50	18,0	0,21	0,85	37,50	10,50	0,14	0,80	3000	0,3 о.е	11 Ом
4	75,00	11,0	0,12	0,80	125,00	10,50	0,21	0,80	2500	10 Ом	0,2 о.е
5	37,50	10,5	0,14	0,80	235,30	15,75	0,19	0,85	1000	0,4 о.е	11 Ом
6	117,50	10,5	0,16	0,85	68,75	10,50	0,18	0,80	∞	0	10 Ом
7	62,50	6,3	0,13	0,80	117,50	10,50	0,16	0,85	4000	0,3 о.е	8 Ом
8	15,00	6,3	0,13	0,80	176,50	18,00	0,21	0,85	∞	0	10 Ом
9	68,75	10,5	0,13	0,80	125,00	10,50	0,21	0,80	1500	0,4 о.е	0,2 о.е
10	37,50	6,3	0,16	0,80	15,00	11,00	0,12	0,80	1000	0,2 о.е	0,1 о.е

Таблица 1.2 – Параметры трансформаторов

№ вариантов	Обозначение на схеме	S _н , мВА	Напряжение обмотки, кВ			U _к %		
			В	С	Н	В-С	В-Н	С-Н
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	T-1	16	230	-	6,3	-	12	-
	T-2,3	80	230	38,5	11	12,5	20	6,5
	T-4,5	40	115	-	38,5	-	10,5	-
	T-6,7	32	230	-	38,5	-	12	-
	T-8,9	250	230	115	11	11	32	20
2	T-1	125	242	-	10,5	-	11	-
	T-2,3	40	280	38,5	10,5	12,5	12	9,5
	T-4,5	25	115	-	11	-	10,5	-
	T-6,7	68	230	-	10,5	-	12,5	-
	T-8,9	200	230	115	38,5	10,5	22	9,5
3	T-1	32	200	-	10,5	-	12,5	-
	T-2,3	100	236	121	18	10,5	24	13
	T-4,5	16	115	-	10,5	-	10	-
	T-6,7	25	230	-	38,5	-	11	-
	T-8,9	125	242	121	38,5	10,5	24	13
4	T-1	125	242	-	10,5	-	11	-
	T-2,3	63	230	38,5	11	12,5	24	10,5
	T-4,5	25	115	-	38,5	-	10,5	-
	T-6,7	63	230	-	38,5	-	12	-
	T-8,9	160	230	121	6,6	11	32	20
5	T-1	200	242	-	15,75	-	11	-
	T-2,3	40	230	38,5	10,5	20,5	12,5	7,5
	T-4,5	10	115	-	11	-	10,5	-
	T-6,7	80	230	-	10,5	-	12	-
	T-8,9	63	240	121	38,5	11	35	22

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	T-1	63	230	-	10,5	-	12	-
	T-2,3	80	230	38,5	11	24	12,5	10,5
	T-4,5	16	121	-	11	-	10,5	-
	T-6,7	32	230	-	6,6	-	11	-
	T-8,9	100	230	115	11	11	31	19
7	T-1	125	242	-	10,5	-	11	-
	T-2,3	40	230	38,5	6,3	12,5	20,5	7,5
	T-4,5	63	115	-	10,5	-	10	-
	T-6,7	40	230	-	11	-	12	-
	T-8,9	250	230	121	38,5	11	32	20
8	T-1	160	230	-	18	-	11	-
	T-2,3	10	230	38,5	6,3	12,5	20	6,5
	T-4,5	25	115	-	38,5	-	11	-
	T-6,7	80	230	-	38,5	-	11	-
	T-8,9	200	230	121	11	10,5	32	19,5
9	T-1	125	242	-	11	-	12	-
	T-2,3	63	230	38,5	11	12,5	24	10,5
	T-4,5	10	115	-	10,5	-	10,5	-
	T-6,7	63	230	-	6,3	-	12	-
	T-8,9	125	230	115	38,5	11	31	19
10	T-1	80	242	-	11	-	11	-
	T-2,3	40	230	38,5	6,3	22	12,5	9,5
	T-4,5	63	115	-	6,6	-	10,5	-
	T-6,7	25	230	-	10,5	-	10,5	-
	T-8,9	63	230	115	6,6	11	32	20

Таблица 1.3 – Параметры линий электропередач и нагрузок

№ вариантов	Линии электропередачи					Нагрузки	
	W-1, км	W-2, км	W-3, км	W-4, км	W-5, км	№ на схеме	Номи- нальная мощность $S_{н}$, кВА
1	40	70	150	110	110	Н-1	5
2	60	80	120	90	90	Н-2	50
3	50	110	80	100	100	Н-4	22
4	40	140	70	120	120	Н-4	35
5	65	95	90	50	50	Н-2	12
6	35	60	85	70	70	Н-3	24
7	50	100	110	80	80	Н-3	40
8	30	90	140	100	100	Н-6	6
9	45	120	100	95	95	Н-5	80
10	35	85	75	90	15	Н-4	9

2 Указания к выполнению курсовой работы

В электроустановках переменного тока напряжением выше 1 кВ расчёт токов короткого замыкания должен проводиться согласно [1].

2.1 Задание № 1

Для выполнения задания необходимо проработать [6], (разделы 2,6; 3,4). Алгоритм расчёта приведён на рис.2.1.

В качестве U_{σ} принимается действительное напряжение точки к.з. Все источники, генераторы, крупные компенсаторы, синхронные и асинхронные двигатели мощностью 100 кВт и более, а также обобщённые нагрузки вводятся в схему замещения своими сверхпереходными параметрами E'' и x'' , выраженными в именованных единицах.

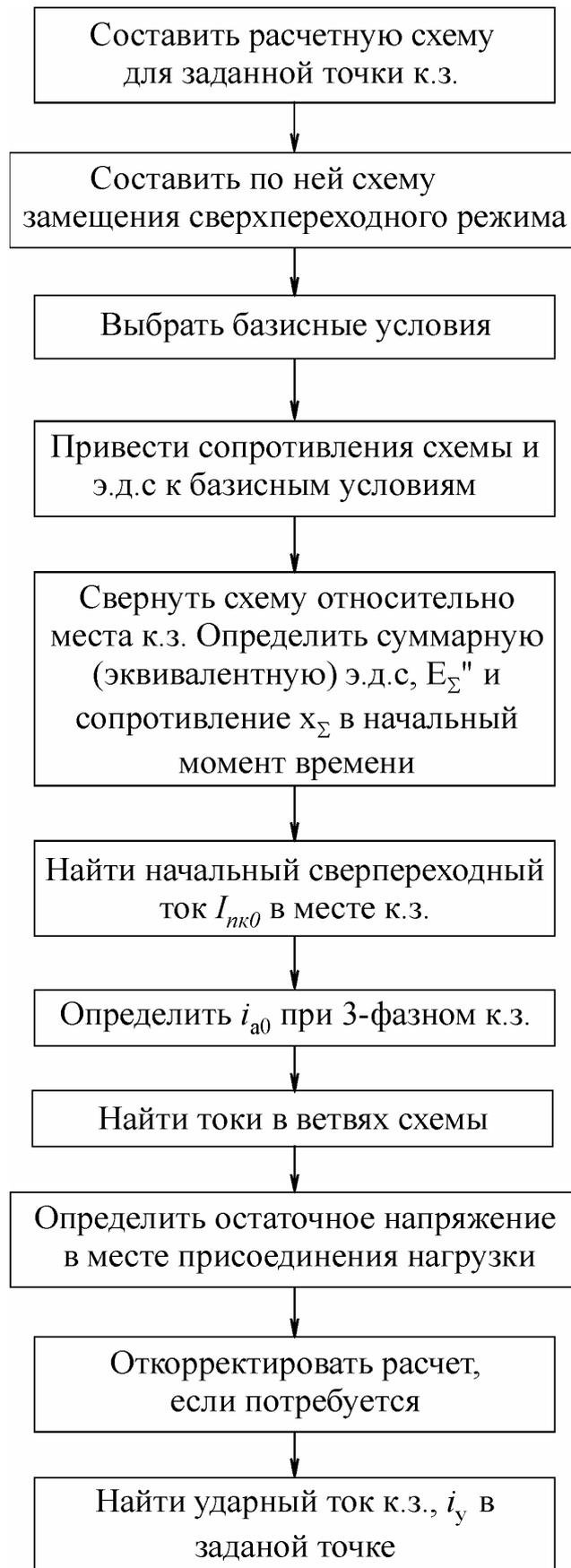


Рисунок 2.1 – Алгоритм расчета токов к.з.

Фазная сверхпереходная э.д.с. источника

$$E'' = E_*'' \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3}} \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n),$$

где E_*'' - сверхпереходная э.д.с. источника в относительных единицах (о.е.);

U_H - номинальное напряжение машины, кВ;

$k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n$ - коэффициенты трансформации трансформаторов, расположенных между ступенью приведения (базисной) и ступенью, на которой находится данный элемент.

Каждый из коэффициентов трансформации определяется в направлении от выбранной ступени (базисной) к ступени, элемент которой приводится. При этом коэффициенты трансформации считаются по действительным напряжениям ступеней (точное приведение).

Сверхпереходная э.д.с. в о.е. определяется по следующей формуле:

$$E_*'' = \sqrt{(U_{0*} \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_{0*} \cdot \sin \varphi_0 \pm I_{0*} \cdot x_*'')^2}$$

где - $U_{0*} = 1$ - фазное напряжение, о.е.;

$I_{0*} = 1$ - фазный ток, о.е.;

φ_0 - угол сдвига между током и напряжением;

x_*'' - сверхпереходное сопротивление машины, о.е.

Все данные величины относятся к предшествующему режиму (для синхронных генераторов, двигателей, синхронных компенсаторов берётся знак плюс, для асинхронных двигателей и обобщённой нагрузки – знак минус).

Обобщенная нагрузка учитывается приближенными значениями [6]

$$E_{*он}'' = 0,85 \quad \text{и} \quad x_{*он}'' = 0,35,$$

выраженными в относительных единицах при номинальной мощности (мВА) нагрузки и среднем номинальном напряжении той, ступени, где она присоединена.

Сопротивления отдельных элементов схем замещения определяются по формулам:

- сопротивления генераторов (СД, СК, АД, ОН)

$$x_2 = x_{d^*}'' \cdot \frac{U_n^2}{S_{H2}} \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n)^2;$$

- сопротивления трансформаторов

$$x_m = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nm}} \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n)^2$$

Трёхобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы входят в схему замещения тремя сопротивлениями (обмоток ВН, СН, НН). Сопротивления обмоток определяются отдельно по той же формуле, что и для двухобмоточных, подставляя вместо u_k напряжения короткого замыкания для каждой обмотки:

$$u_{kB} = 0,5 \cdot (u_{kB-C} + u_{kB-H} + u_{kC-H});$$

$$u_{kC} = 0,5 \cdot (u_{kB-C} + u_{kC-H} + u_{kB-H});$$

$$u_{kH} = 0,5 \cdot (u_{kB-H} + u_{kC-H} + u_{kB-H});$$

- сопротивление линий электропередач (ЛЭП)

$$x_l = x_{nl} \cdot l \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n)^2$$

где x_{nl} - погонное сопротивление ЛЭП, Ом/км;

l - длина линии, км.

Если активное сопротивление схемы замещения r_Σ составляет больше $\frac{1}{3} x_\Sigma$, то его необходимо учитывать в расчете.

2.2 Задание № 2

Для выполнения задания необходимо проработать [6], (разделы 5, 6,10).

Составляется схема замещения для заданной системы (рис.1.1). Поскольку метод типовых кривых достаточно приближенный, схему замещения целесообразно составлять упрощенно, т.е. без учёта действительных коэффициентов трансформации трансформаторов. В эту схему генераторы вводят своими сопротивлениями, x_d'' , для начального момента времени, нагрузки в ней должны отсутствовать, поскольку они учтены при построении кривых. Расчёт ведётся в относительных единицах с учётом индивидуального изменения тока источника.

Предварительно выбираются базисные условия $S_{\bar{\sigma}}$ и $U_{\bar{\sigma}}$. За $S_{\bar{\sigma}}$ целесообразно принимать для удобства числа, кратные десяти (100 мВА, 1000 мВА и т.д). За $U_{\bar{\sigma}}$ рекомендуется принимать среднее номинальное напряжение той ступени, где рассматривается к.з..

Определяются сопротивления элементов схемы по формулам:

- сопротивления генераторов (синхронных двигателей, компенсаторов, обобщённой нагрузки)

$$x_{g*(\bar{\sigma})} = x_{d*}'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{нг}}$$

где $S_{нг}$ - номинальная мощность генератора (двигателя, обобщённой нагрузки);

- сопротивления трансформаторов

$$x_{m*(\bar{\sigma})} = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{нт}}$$

где $S_{нт}$ - номинальная мощность трансформатора;

- сопротивления линий

$$x_{л*(\bar{\sigma})} = x_{нл} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{срл}^2}$$

где $U_{срл}$ - среднее номинальное напряжение той ступени, где находится данная линия.

Постепенным преобразованием схему замещения приводят к простейшему виду и находят результирующие сопротивления $x_{\Sigma*i}$ для каждого источника в отдельности (т.к. расчёт ведётся по индивидуальному изменению). Система бесконечной мощности выделяется в отдельную ветвь.

Для каждой ветви определяют начальное значение тока к.з.

$$I_{нк0_i} = \frac{E_{*0_i}}{x_{*\Sigma_i}} \cdot I_{\bar{\sigma}}$$

Для определения удаленности тока к.з. от источников пользуются отношением

$$I_{*n0(ном)_i} = \frac{I_{пк0_i}}{\dot{I}_{ном_i}}$$

где $\dot{I}_{ном_i}$ - номинальный ток источника, приведенный к базисному напряжению.

$$\dot{I}_{ном_i} = \frac{S_{ном_i}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}}$$

В зависимости от удаленности тока к.з. выбирают типовые кривые (рисунки 2.1, 2.2, 2.3, 2.4).

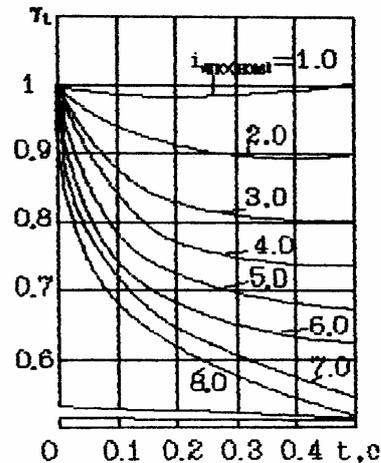


Рисунок 2.1 – Изменение периодической составляющей тока к.з. от синхронных машин с тиристорной или высокочастотной системой возбуждения

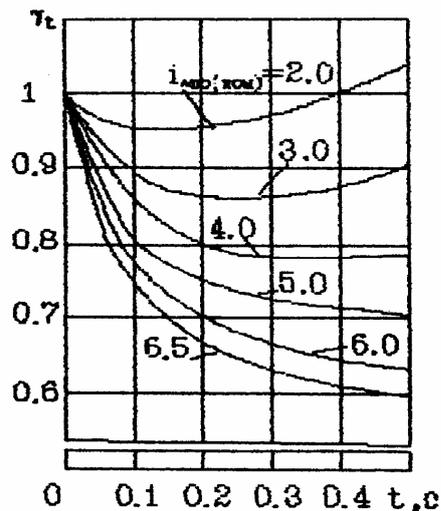


Рисунок 2.2 – Изменение периодической составляющей тока к.з. от синхронных машин с тиристорной системой самовозбуждения и с последовательными трансформаторами

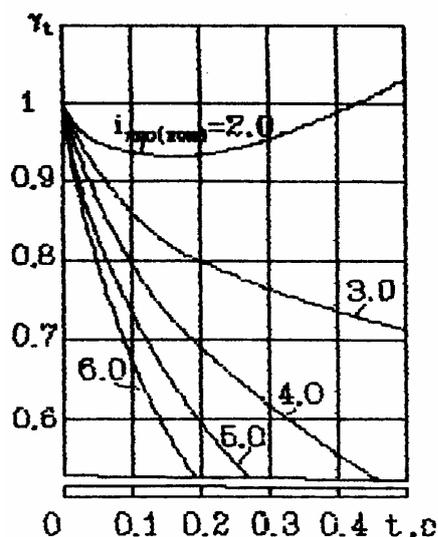


Рисунок 2.3 – Изменение периодической составляющей тока к.з. от синхронных машин с тиристорной системой самовозбуждения без последовательных трансформаторов

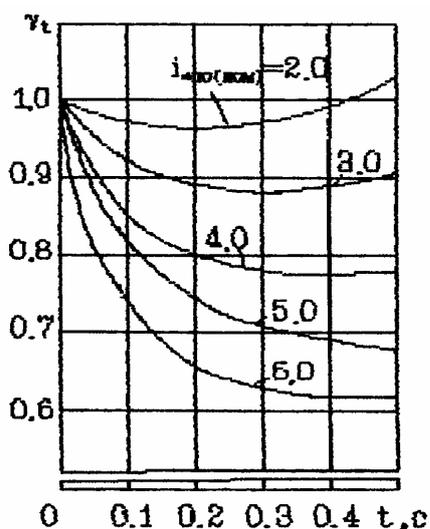


Рисунок 2.4 – Изменение периодической составляющей тока к.э. от синхронных машин с диодной бесщеточной системой возбуждения

По кривым $\gamma_t f(t)$ в соответствии с найденным значением $I_{*n0(ном)_i}$ для заданного момента времени находят кратность тока к.з. для интересующего момента времени, γ_t .

Далее определяется действующее значение периодической слагающей тока к.з. от каждого из источников в момент времени t по формуле

$$I_{nkt_i} = \gamma_{t_i} \cdot I_{nk0_i}.$$

Суммарный ток к.з. определяется суммой токов к.з. от всех источников, участвующих в схеме

$$I_{nkt_{\Sigma}} = I_{nkt_1} + I_{nkt_2} + \dots + I_{nkt_n} .$$

Для системы удаленность определять не следует, т.к. ее мощность велика по отношению к нагрузке, и ток от системы будет одинаков для любого момента времени

$$I_{nk0c} = I_{nk\infty c} = const = I_{*nk0c} \cdot I_{\bar{b}} ,$$

где I_{*nk0c} - значение тока к.з. от системы бесконечной мощности, о.е.

$$I_{*nk0c} = \frac{1}{x_{*\Sigma c}} .$$

2.3 Задание № 3

Для выполнения первого пункта нужно проработать [6] (разделы 3, 4, 6, 11, 12, 13, 14).

Рассматриваемые несимметричные режимы ограничены условием, что несимметрия возникает только в одном каком-либо месте системы (в месте к.з.), в то время как вся остальная часть остаётся строго симметричной.

Анализ несимметричных режимов производится на основе метода симметричных составляющих, согласно которому при возникновении несимметрии рассматриваются отдельные схемы замещения прямой, обратной, нулевой последовательностей данной системы, рассматриваются токи и напряжения в них и определяются по ним фазные величины, $\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}$.

В соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности, ток прямой последовательности любого несимметричного к.з., может быть определён как ток при трёхфазном к.з. в точке, удалённой от действительной точки к.з. на дополнительное сопротивление, $x_{\Delta}^{(n)}$, определяемое видом к.з.

$$\dot{I}_{kA1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{A1\Sigma}}{j \cdot (x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})} ,$$

где $\dot{E}_{A1\Sigma}$ - результирующая э.д.с. схемы прямой последовательности;

$x_{1\Sigma}$ - результирующее сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки к.з.

При этом токи обратной и нулевой последовательностей, напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте к.з. Эти соотношения, а также величины их для различных видов к.з. указаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Величины дополнительной реактивности и симметричных составляющих токов и напряжений

Вид к.з., n	$x_{\Delta}^{(n)}$	\dot{I}_{kA2}	\dot{I}_{kA0}	\dot{U}_{kA1}	\dot{U}_{kA2}	\dot{U}_{kA0}
(2)	$x_{2\Sigma}$	$-\dot{I}_{kA1}$	0	$x_{2\Sigma}$	$x_{2\Sigma} \cdot \dot{I}_{kA1}$	0
(1)	$x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$	\dot{I}_{kA1}	\dot{I}_{kA1}	$x_{\Delta}^{(1)} \cdot \dot{I}_{kA1}$	$-x_{2\Sigma} \cdot \dot{I}_{kA1}$	$-x_{0\Sigma} \cdot \dot{I}_{kA1}$
(1, 1)	$\frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$	$\frac{x_{\Delta}^{(1.1)}}{x_{2\Sigma}} \cdot \dot{I}_{kA1}$	$\frac{x_{\Delta}^{(1.1)}}{x_{0\Sigma}} \cdot \dot{I}_{kA1}$	$x_{\Delta}^{(1.1)} \cdot \dot{I}_{kA1}$	$x_{\Delta\Sigma}^{(1.1)} \cdot \dot{I}_{kA1}$	$x_{\Delta}^{(1.1)} \cdot \dot{I}_{kA1}$

Правило эквивалентности прямой последовательности позволяет использовать при расчёте любого вида несимметричного к.з. практические методы и приемы расчёта трёхфазного к.з.. Для проведения расчётов, необходимо составить схемы замещения всех последовательностей (прямой, обратной и нулевой) и определить результирующие сопротивления этих схем относительно точки к.з.

Схема прямой последовательности соответствует обычной схеме, используемой для расчёта симметричного трёхфазного режима. Генераторы и нагрузки вводятся в неё соответствующими реактивностями и э.д.с. x'' и E'' . Все остальные элементы входят в схему замещения неизменными во времени сопротивлениями.

Началом схемы прямой последовательности считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. Концом схемы прямой последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия.

Схема замещения обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности. Различие состоит в том, что в схеме обратной последовательности э.д.с. всех генерирующих элементов принимают равными нулю. Начало и конец схемы обратной последовательности определяются так же, как и для схемы прямой последовательности.

Схема замещения нулевой последовательности в значительной мере определяется соединением обмоток входящих в неё трансформаторов и автотрансформаторов. Составление схемы нулевой последовательности следует начинать, как правило, от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и в ней приложено напряжение нулевой последовательности.

Далее следует выявить в пределах каждой электрически связанной цепи возможные пути протекания токов нулевой последовательности. Для циркуляции токов нулевой последовательности необходима, по меньшей мере, хотя бы одна заземлённая нейтраль в той же электрически связанной цепи, где приложено это напряжение.

В схему замещения нулевой последовательности войдут лишь те элементы схемы, через которые протекают токи нулевой последовательности. Сопротивления элементов в схеме нулевой последовательности в общем случае существенно отличается от их сопротивлений в схемах прямой и обратной последовательностей, а именно:

а) синхронные машины в схему нулевой последовательности не входят – поскольку они присоединяются к системе через трансформаторы со схемой соединения обмоток Δ/Y , а сами генераторы работают с изолированной или компенсированной нейтралью, это исключает протекание через них токов нулевой последовательности;

б) трансформаторы – величина сопротивления нулевой последовательности определяется их конструкцией и соединением обмоток. Со стороны обмотки, соединённой в Δ или Y , независимо от того, как соединены другие обмотки, токи нулевой последовательности протекать не могут, т.к. для них нет пути возврата через землю. В этом случае для трансформаторов $x_0 = \infty$.

Путь для циркуляции токов нулевой последовательности имеет место лишь в тех трансформаторах, которые со стороны места повреждения имеют обмотку, соединённую в звезду с заземлённой нейтралью. В этом случае сопротивления трансформаторов должны быть учтены в схеме замещения нулевой последовательности.

Для всех двухобмоточных трансформаторов со схемой соединения обмотки Y_0/Δ индуктивное сопротивление нулевой последовательности $x_0 = x_{BH} + x_{HH} = x_1$, т.е. равно сопротивлению прямой последовательности.

В зависимости от конструкции трансформаторов в схеме учитывается реактивность ветви намагничивания нулевой последовательности $x_{\mu 0}$.

Для группы из трёх однофазных трансформаторов, а также броневых трансформаторов ток намагничивания нулевой последовательности очень мал, т.к. в этом случае условия для магнитного потока практически те же, что и при питании трансформатора от источника напряжения прямой последовательности. Поэтому можно считать, что для таких трансформаторов $x_{0T} = x_{1T}$.

Иные условия в трёхфазных трёхстержневых трансформаторах, где магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через изолирующую среду и кожух трансформатора. Для проведения магнитного потока по пути со столь высоким сопротивлением необходим достаточно большой ток намагничивания. Поэтому реактивность $x_{\mu 0}$ у трансформаторов такого типа значительно меньше, чем $x_{\mu 1}$. В зависимости от конструкции этого типа трансформатора она находится в пределах $x_{\mu 0} = (0,3 - 1,0)x_{\mu 1}$.

Имея в виду, что величина x_{HH} всё же значительно меньше $x_{\mu 0}$, можно практически считать, что и для трёхстержневого трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ $x_{\mu 0} = \infty$.

Аналогично вводится в схему замещения трёхфазный трёхобмоточный трансформатор, у которого имеется обмотка, соединённая в треугольник.

В схеме замещения трансформатора не участвует обмотка, соединённая в звезду с незаземлённой нейтралью, т.к. в ней не могут циркулировать токи нулевой последовательности.

Обмотка, соединённая в звезду с заземлением нейтрали, вводится в схему замещения при условии, что на стороне этой обмотки обеспечен путь для тока нулевой последовательности, т.е. в её цепи имеется, по меньшей мере ещё хотя бы одна заземлённая нейтраль, показанная на рис.2.2. пунктиром.

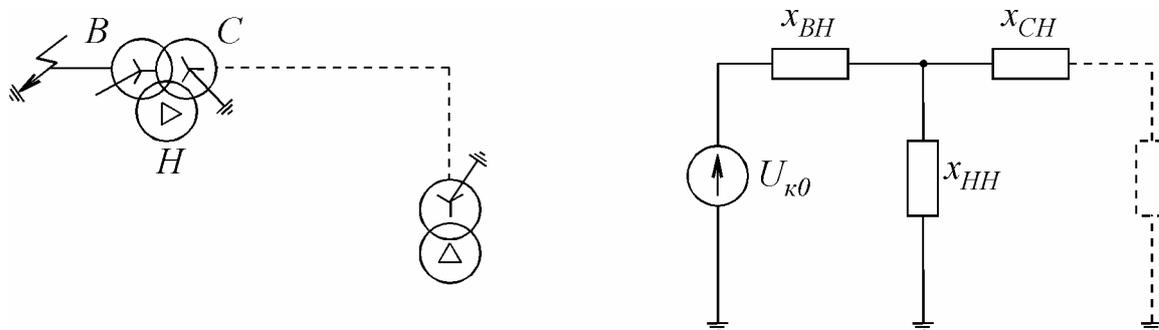


Рисунок 2.2 – Схема замещения трансформатора в схеме нулевой последовательности

В случае автотрансформатора в схеме замещения участвуют все обмотки, поскольку через автотрансформатор токи нулевой последовательности могут переходить со стороны высшего напряжения на сторону среднего напряжения и наоборот, т.к. обмотки ВН и СН имеют общую нейтраль.

Сопротивления схемы замещения x_{BH} , x_{CH} , x_{HH} находят по тем же формулам, как и в случае трёхфазного к.з.

Воздушные линии – имеют сопротивления $x_{0л}$ значительно большее, чем сопротивление прямой (обратной) последовательности. Это обусловлено тем, что при токе прямой (обратной) последовательности взаимоиנדукция с другими фазами уменьшает сопротивление фаз, тогда как при токе нулевой последовательности взаимоиנדукция между фазами увеличивает сопротивления фаз.

Для одноцепной линии сопротивление нулевой последовательности определяется

$$Z_0 = Z_L + 2Z_M , \quad ,$$

а сопротивление прямой последовательности

$$Z_1 = Z_L - Z_M , \quad ,$$

где Z_L и Z_M - индуктивность фазы и сопротивление взаимоиндукции между фазами, определённые с учётом возврата тока нулевой последовательности через землю.

Сопротивление нулевой последовательности каждой цепи двухцепной линии дополнительно увеличивается, благодаря взаимоиндукции с проводами параллельной цепи

$$Z_{02ц} = Z_L + 2Z_M - 3Z_{I-II_0},$$

где Z_{I-II_0} - сопротивление взаимоиндукции между цепями.

При наличии у линии заземлённых тросов её индуктивное сопротивление нулевой последовательности снижается за счёт реакции от наведённых токов в тросе

$$Z_0 = Z_L + 2Z_M - 3 \frac{Z_{II_0}^2}{Z_{T_0}},$$

где Z_{II_0} - сопротивление взаимоиндукции между проводом и тросом;

Z_{T_0} - сопротивление троса.

В практических расчётах принимают:

- для одноцепной линии без троса $x_0 = 3,5x_1$;
- то же с заземлёнными тросами $x_0 = 2,0x_1$;
- для двухцепной линии без тросов $x_0 = 5,5x_1$;
- то же с заземлёнными тросами $x_0 = 3,0x_1$.

Расчет токов к.з. производится в следующей последовательности:

1) составляются схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. (Для двухфазного к.з. составляются схемы прямой и обратной последовательностей);

2) определяются значения сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей элементов схемы в именованных единицах по приближенной схеме замещения (с учётом средних номинальных напряжений ступеней);

3) применяя методы преобразования, определяются эквивалентные сопротивления схем прямой $x_{1\Sigma}$, обратной $x_{2\Sigma}$ и нулевой $x_{0\Sigma}$ последовательностей, а в схеме прямой последовательности кроме того определяется эквивалентная э.д.с. $E_{A1\Sigma}$;

4) определяется дополнительное сопротивление $x_{\Delta}^{(n)}$ для соответствующего вида к.з. (см. таблицу 2.1);

5) определяется ток прямой последовательности несимметричного короткого замыкания $I_{kA1}^{(n)} = \frac{E_{A1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}$;

6) определяются токи обратной и нулевой последовательностей, а также напряжения всех последовательностей (см. таблицу 2.1);

7) определяются фазные величины токов и напряжений к.з., которые равны геометрической сумме составляющих отдельных последовательностей;

Модули токов к.з. в повреждённых фазах могут так же определяться с помощью коэффициентов пропорциональности, $m^{(n)}$, которые зависят от вида к.з.

$$I_k^{(n)} = I_{kA1}^{(n)} \cdot m^{(n)},$$

Значения $m^{(n)}$ принимаются по таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов пропорциональности $m^{(n)}$ для различных видов к.з.

Вид к.з.	Обозначение $k^{(n)}$	Коэффициент пропорциональности $m^{(n)}$
Двухфазное	$k^{(2)}$	$\sqrt{3}$
Однофазное	$k^{(1)}$	3
Двухфазное к.з. с землёй	$k^{(1.1)}$	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma})^2}}$

3 Примеры расчётов

Принципиальная схема электрической системы приведена на рисунке 3.1.

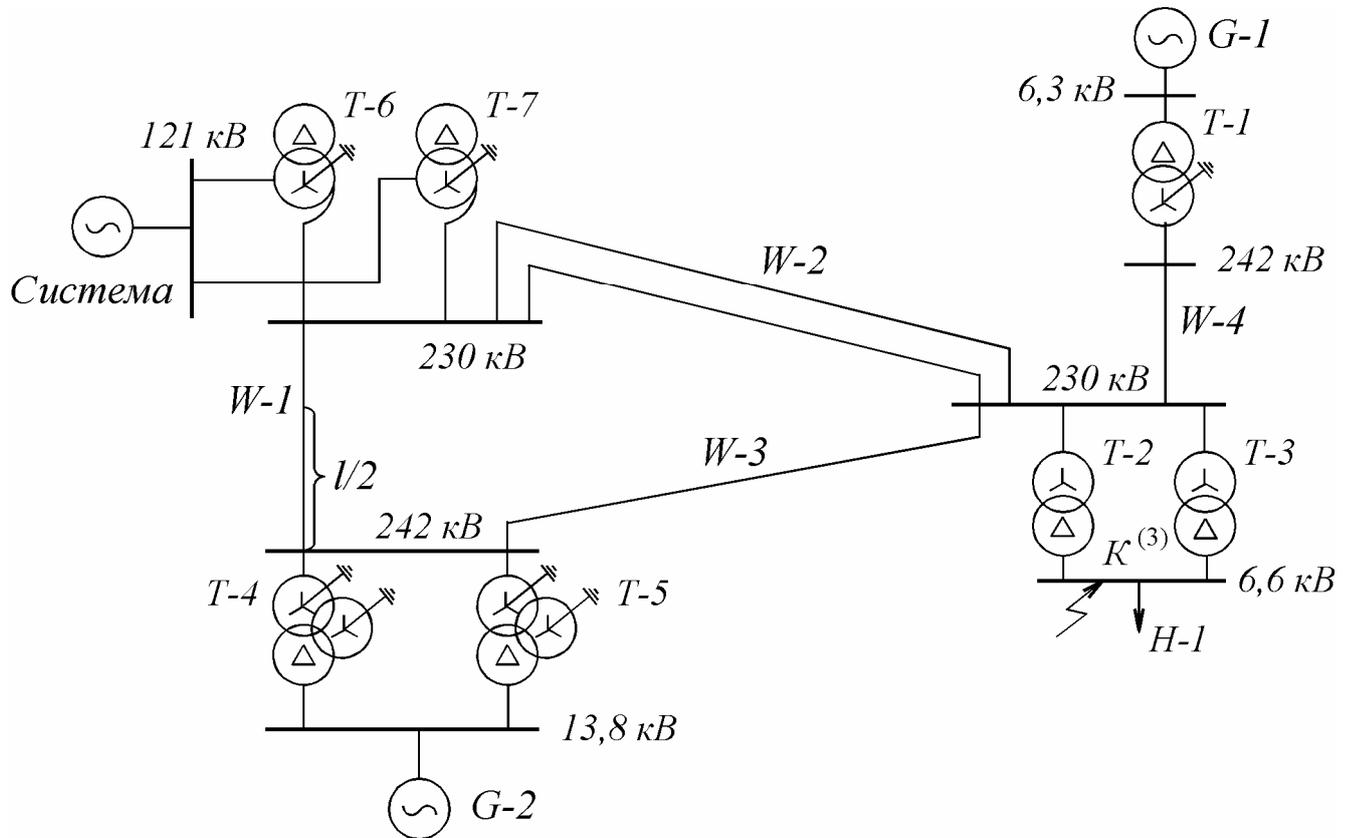


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема электрической системы

Исходные данные для схемы на рисунке 3.1

Генераторы	S_H , МВА	$\cos \varphi_H$	U_H , кВ	x_d'' , (о.е.)
G-1	62,5	0,8	6,3	0,13
G-2	100	0,9	13,8	0,22

Трансформаторы	S_H , МВА	U_H , кВ			u_k %		
		В	С	Н	В	С	Н
T-1	63	242	-	6,3	-	11	-
T-2,3	16	230	-	6,6	-	12	-
T-4,5	63	242	121	13,8	12,5	24	10,5
T-6,7	250	230	121	11	10,5	22	9,5

Линии	<i>W-1</i>	<i>W-2</i>	<i>W-3</i>	<i>W-4</i>
<i>l</i> , (км)	150	100	120	50
Нагрузка	<i>H-1</i>		<i>S</i> = 22МВА	
Система	<i>S_{нс}</i> = 2500МВА	<i>x_{C1}</i> = 0,3 (о.е.)		<i>x_{C0}</i> = 10 Ом

3.1 Пример выполнения задания № 1

При трёхфазном к.з. в точке $K^{(3)}$ схемы определить аналитическим путём начальное значение периодической слагающей тока к.з. и ударного тока.

1) По заданной расчетной схеме составляется схема замещения, рисунок 3.2.

2) Принимаются базисные условия. За основную ступень принята ступень напряжения, где находится точка к.з. ($U_{\delta} = 6,6$ кВ).

3) Находятся сопротивления схемы замещения и э.д.с. источников. Параметры элементов схемы выражаются в именованных единицах с учётом заданных (действительных) коэффициентов трансформации трансформаторов. Определяются фазные э.д.с. источников питания.

Э.д.с. системы

$$E_1'' = E_{*C}'' \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3}} \cdot k_{T-6} \cdot k_{T-2};$$

$$E_1'' = 1,0 \cdot \frac{121}{\sqrt{3}} \cdot \frac{230}{121} \cdot \frac{6,6}{230} = 3,82 \text{ кВ.}$$

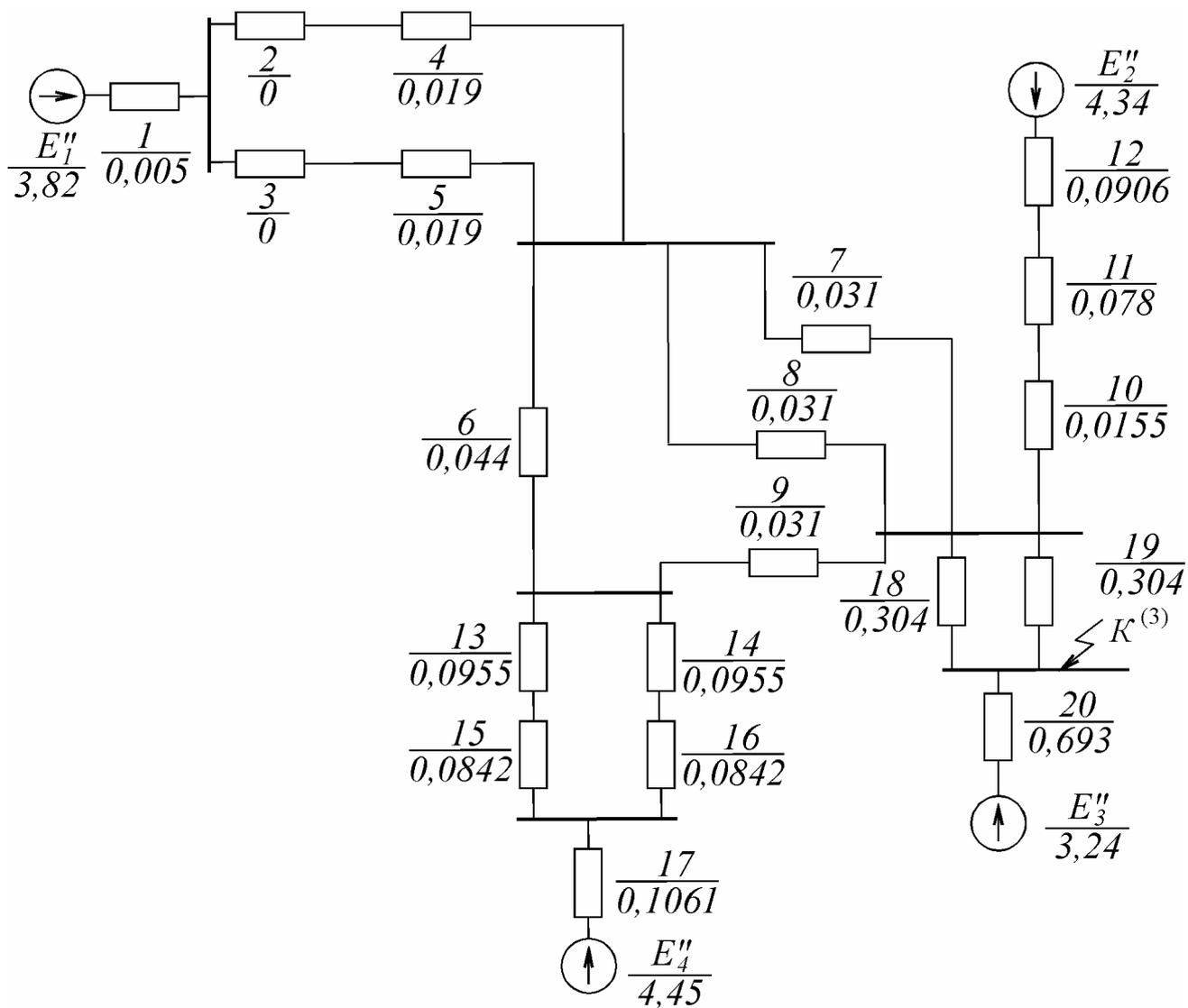


Рисунок 3.2

Э.д.с. генераторов определяются из предположения, что генераторы до аварии работали в нормальном режиме

для G-1

$$E_2'' = E_{*H}'' \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3}} \cdot k_{T-1} \cdot k_{T-2} ;$$

$$E_2'' = 1,08 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} \cdot \frac{242}{6,3} \cdot \frac{6,6}{230} = 4,34 \text{ кВ};$$

$$\text{где } E_{*H}'' = \sqrt{(U_{*H} \cdot \cos \varphi_H)^2 + (U_{*H} \cdot \sin \varphi_H + I_{*H} \cdot x_d'')^2};$$

$$E_{*H}'' = \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 1 \cdot 0,13)^2} = 1,08;$$

$$\sin \varphi_H = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H};$$

$$\sin \varphi_H = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6.$$

Для G-2

$$E_4'' = E_{*H}'' \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3}} \cdot k_{T-2} \cdot k_{T-4};$$

$$E_4'' = 1,11 \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} \cdot \frac{242}{13,8} \cdot \frac{6,6}{230} = 4,45 \text{ кВ};$$

$$\text{где } E_{*H}'' = \sqrt{(1 \cdot 0,9)^2 + (1 \cdot 0,44 + 1 \cdot 0,22)^2} = 1,11;$$

$$\sin \varphi_H = \sqrt{1 - 0,9^2} = 0,44.$$

Э.д.с. нагрузки

$$E_3'' = E_{*OH}'' \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3}};$$

$$E_3'' = 0,85 \cdot \frac{6,6}{\sqrt{3}} = 3,24 \text{ кВ}.$$

Определяются сопротивления элементов схемы.

Системы

$$x_1 = x_{C1} \cdot \frac{U_H^2}{S_{HC}} \cdot k_{T-2}^2 \cdot k_{T-6}^2;$$

$$x_1 = 0,3 \cdot \frac{121^2}{2500} \cdot \left(\frac{230}{121} \cdot \frac{6,6}{230} \right)^2 = 0,005 \text{ Ом}.$$

Автотрансформаторов Т-6, Т-7:

$$u_{KB} = 0,5 \cdot (u_{KB-C} + u_{KB-H} - u_{KC-H});$$

$$u_{KB} = 0,5 \cdot (10,5 + 0,5 - 9,5) = 11,5\%;$$

$$u_{KC} = 0,5 \cdot (u_{KB-C} + u_{KC-H} - u_{KB-H});$$

$$u_{KC} = 0,5 \cdot (10,5 + 0,5 - 22) = -1\%;$$

$$u_{KH} = 0,5 \cdot (u_{KB-H} + u_{KC-H} - u_{KB-C});$$

$$u_{KH} = 0,5 \cdot (220 + 9,5 - 10,5) = 10,5\%;$$

Так как через обмотки низшего напряжения автотрансформаторов Т-6, Т-7 ток к.з. не протекает, эти обмотки не включены в схему замещения. Поскольку сопротивления обмоток среднего напряжения этого же автотрансформатора емкостного характера, $U_{KC} = -1\%$, ими пренебрегают (в силу принятых допущений [1, 3, 6]).

$$x_2 = x_3 = x_{CT-6,7} = \frac{u_{KC\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{HT}} \cdot k_{T-2}^2 = 0;$$

$$x_4 = x_5 = x_{BT-6,7} = \frac{u_{KB\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{HT}} \cdot k_{T-2}^2;$$

$$x_4 = x_5 = x_{BT-6,7} = \frac{11,5\%}{100} \cdot \frac{230^2}{250} \cdot \left(\frac{6,6}{230}\right)^2 = 0,019 \text{ Ом}$$

Линии электропередач:

$$x_6 = x_{w-1} = x_{nl} \cdot l_1 \cdot k_{T-2}^2;$$

$$x_6 = x_{w-1} = 0,4 \cdot 150 \cdot \left(\frac{6,6}{230}\right)^2 = 0,044 \text{ Ом}$$

$$x_7 = x_8 = x_{w-2} = x_{nl} \cdot l_2 \cdot k_{T-2}^2;$$

$$x_7 = x_8 = x_{w-2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \left(\frac{6,6}{230}\right)^2 = 0,031 \text{ Ом}$$

$$x_9 = x_{w-3} = x_{nl} \cdot l_3 \cdot k_{T-2}^2;$$

$$x_9 = x_{w-3} = 0,4 \cdot 120 \cdot \left(\frac{6,6}{230}\right)^2 = 0,037 \text{ Ом}$$

$$x_{10} = x_{w-4} = x_{nl} \cdot l_4 \cdot k_{T-2}^2;$$

$$x_{10} = x_{w-4} = 0,4 \cdot 50 \cdot \left(\frac{6,6}{230}\right)^2 = 0,0155 \text{ Ом}$$

Усредненное значение погонного сопротивления для воздушных линий в соответствии с [6] принято $x_{nl} = 0,4 \text{ Ом/км}$.

Трансформатора Т-1

$$x_{11} = \frac{u_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{HT}} \cdot k_{T-2}^2 ;$$
$$x_{11} = \frac{11\%}{100} \cdot \frac{242^2}{63} \cdot \left(\frac{6,6}{230}\right)^2 = 0,078 \text{ Ом.}$$

Генератора G-1

$$x_{12} = x_{d^*}'' \cdot \frac{U_H^2}{S_{HT}} \cdot k_{T-2}^2 \cdot k_{T-1}^2 ;$$
$$x_{12} = 0,13 \cdot \frac{6,3^2}{62,5} \cdot \left(\frac{6,6}{230}\right)^2 \cdot \left(\frac{230}{6,3}\right)^2 = 0,0906 \text{ Ом.}$$

Трансформаторов Т-4, Т-5 (аналогично Т-6, Т-7)

$$u_{KB} = 0,5 \cdot (12,5 + 24 - 10,5) = 13\% ;$$

$$u_{KC} = 0,5 \cdot (12,5 + 10,5 - 24) = -0,5\% ;$$

$$u_{KH} = 0,5 \cdot (24 + 10,5 - 12,5) = 11\% ;$$

Так как через обмотки среднего напряжения трансформаторов Т-4, Т-5 ток к.з. не протекает, эти обмотки не включены в схему замещения

$$x_{13} = x_{14} = x_{B_{T-4,5}} = \frac{u_{KB\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{HT}} \cdot k_{T-2}^2 ;$$
$$x_{13} = x_{14} = x_{B_{T-4,5}} = \frac{13\%}{100} \cdot \frac{242^2}{63} \cdot \left(\frac{6,6}{230}\right)^2 = 0,0995 \text{ Ом}$$
$$x_{15} = x_{16} = x_{H_{T-4,5}} = \frac{u_{KH\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{HT}} \cdot k_{T-2}^2 ;$$
$$x_{15} = x_{16} = x_{H_{T-4,5}} = \frac{11\%}{100} \cdot \frac{242^2}{63} \cdot \left(\frac{6,6}{230}\right)^2 = 0,0842 \text{ Ом}$$

Генератора G-2

$$x_{17} = x_{d^*}'' \cdot \frac{U_H^2}{S_{HT}} \cdot k_{T-2}^2 \cdot k_{T-4}^2 ;$$

$$x_{17} = 0,22 \cdot \frac{13,8^2}{100} \cdot \left(\frac{6,6}{230}\right)^2 \cdot \left(\frac{242}{13,8}\right)^2 = 0,1061 \text{ Ом.}$$

Трансформаторов Т-2, Т-3

$$x_{18} = x_{19} = \frac{u_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_{HT}} ;$$

$$x_{18} = x_{19} = \frac{12\%}{100} \cdot \frac{6,6^2}{16} = 0,304 \text{ Ом.}$$

Нагрузки Н-1

$$x_{20} = x_{*OH} \cdot \frac{U_H^2}{S_{HT}} ;$$

$$x_{20} = 0,35 \cdot \frac{6,6^2}{22} = 0,693 \text{ Ом}$$

Полученные результаты вносятся в схему замещения, приведённую на рисунке 3.2.

5) Преобразуется схема замещения для определения E_{Σ}'' и x_{Σ} , при этом используется последовательное и параллельное сложение сопротивлений, преобразования треугольника в звезду и обратно

$$x_{21} = x_{14} + x_{16} ;$$

$$x_{21} = 0,0995 + 0,0842 = 0,1837 \text{ Ом;}$$

$$x_{22} = x_{13} + x_{15} ;$$

$$x_{22} = 0,0995 + 0,0842 = 0,1837 \text{ Ом;}$$

$$x_{23} = x_2 + x_4 ;$$

$$x_{23} = 0 + 0,019 = 0,019 \text{ Ом;}$$

$$x_{24} = x_3 + x_5 ;$$

$$x_{24} = 0 + 0,019 = 0,019 \text{ Ом;}$$

$$x_{25} = \frac{x_7 \cdot x_8}{x_7 + x_8} ;$$

$$x_{25} = \frac{0,031 \cdot 0,031}{0,031 + 0,031} = 0,0155 \text{ Ом;}$$

$$x_{26} = x_{10} + x_{11} + x_{12};$$

$$x_{26} = 0,015 + 0,078 + 0,0906 = 0,188 \text{ Ом};$$

$$x_{27} = \frac{x_{18}}{2};$$

$$x_{27} = \frac{0,304}{2} = 0,152 \text{ Ом}$$

В результате получится схема, представленная на рисунке 3.3.

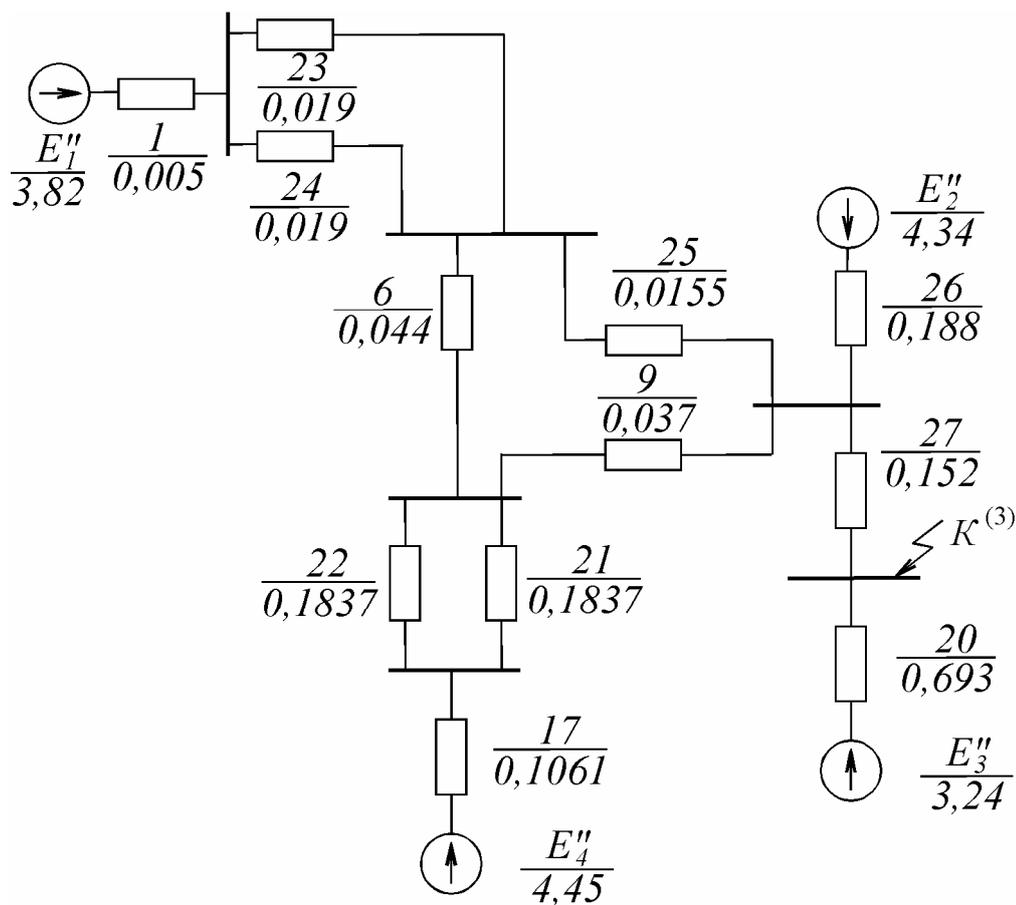


Рисунок 3.3

Дальнейшие преобразования очевидны из схемы (рисунок 3.3).

$$x_{28} = \frac{x_{21} \cdot x_{22}}{x_{21} + x_{22}};$$

$$x_{28} = \frac{0,1837 \cdot 0,1837}{0,1837 + 0,1837} = 0,09185 \text{ Ом};$$

$$x_{29} = \frac{x_{23} \cdot x_{24}}{x_{23} + x_{24}};$$

$$x_{29} = \frac{0,019 \cdot 0,019}{0,019 + 0,019} = 0,0095 \text{ Ом.}$$

Треугольник с сопротивлениями 6, 25, 9 преобразовывается в звезду с сопротивлениями 30, 31, 32.

$$x_{30} = \frac{x_6 \cdot x_{25}}{x_6 + x_{25} + x_9};$$

$$x_{30} = \frac{0,044 \cdot 0,0155}{0,044 + 0,0155 + 0,037} = 0,00707 \text{ Ом};$$

$$x_{31} = \frac{x_{25} \cdot x_9}{x_6 + x_{25} + x_9};$$

$$x_{31} = \frac{0,0155 \cdot 0,037}{0,044 + 0,0155 + 0,037} = 0,0059 \text{ Ом};$$

$$x_{32} = \frac{x_9 \cdot x_6}{x_6 + x_{25} + x_9};$$

$$x_{32} = \frac{0,037 \cdot 0,044}{0,044 + 0,0155 + 0,037} = 0,0169 \text{ Ом};$$

При этом получается схема, представленная на рисунке 3.4

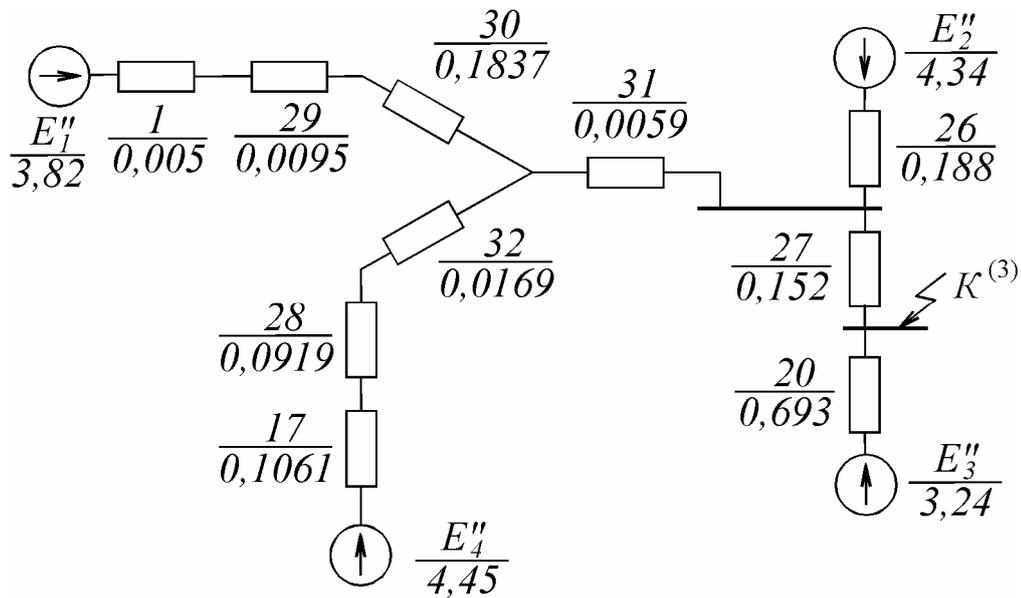


Рисунок 3.4

$$x_{33} = x_1 + x_{29} + x_{30};$$

$$x_{33} = 0,0005 + 0,0095 + 0,0071 = 0,0216 \text{ Ом}$$

$$x_{34} = x_{17} + x_{28} + x_{32};$$

$$x_{34} = 0,1061 + 0,0919 + 0,0169 = 0,2149 \text{ Ом}$$

После этих преобразований получится схема (рисунок 3.5).

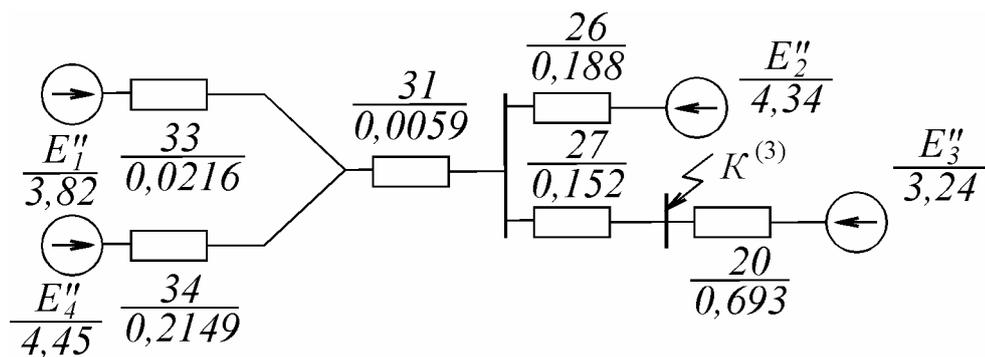


Рисунок 3.5

$$E_5'' = \frac{E_1'' \cdot x_{34} + E_4'' \cdot x_{33}}{x_{33} + x_{34}};$$

$$E_5'' = \frac{3,8 \cdot 0,2149 + 4,45 \cdot 0,0216}{0,0216 + 0,2149} = 3,86 \text{ кВ};$$

$$x_{35} = \frac{x_{33} \cdot x_{34}}{x_{33} + x_{34}};$$

$$x_{35} = \frac{0,0216 \cdot 0,2149}{0,0216 + 0,2149} = 0,0196 \text{ Ом.}$$

$$x_{36} = x_{35} + x_{31};$$

$$x_{23} = 0,0196 + 0,0059 = 0,0255 \text{ Ом};$$

В результате преобразований получится схема (рисунок 3.6).

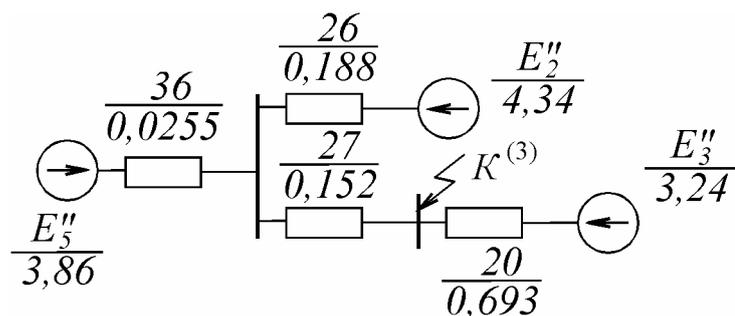


Рисунок 3.6

$$E_6'' = \frac{E_5'' \cdot x_{26} + E_2'' \cdot x_{36}}{x_{26} + x_{36}};$$

$$E_5'' = \frac{3,86 \cdot 0,188 + 4,34 \cdot 0,0255}{0,0188 + 0,0255} = 3,917 \text{ кВ};$$

$$x_{37} = \frac{x_{26} \cdot x_{36}}{x_{26} + x_{36}};$$

$$x_{37} = \frac{0,188 \cdot 0,0255}{0,188 + 0,0255} = 0,0225 \text{ Ом.}$$

$$x_{38} = x_{37} + x_{27};$$

$$x_{38} = 0,0225 + 0,152 = 0,1745 \text{ Ом};$$

После этих преобразований получится схема (рисунок 3.7).

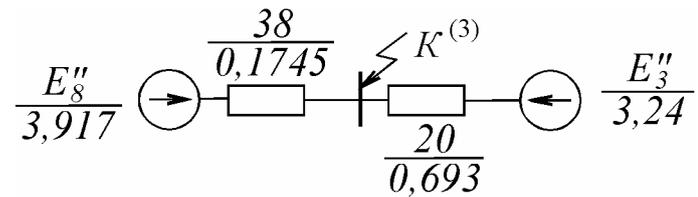


Рисунок 3.7

$$E_{\Sigma}'' = \frac{E_8'' \cdot x_{20} + E_3'' \cdot x_{38}}{x_{20} + x_{38}};$$

$$E_{\Sigma}'' = \frac{3,917 \cdot 0,693 + 3,24 \cdot 0,1745}{0,693 + 0,1745} = 3,781 \text{ кВ};$$

$$x_{\Sigma} = \frac{x_{20} \cdot x_{38}}{x_{20} + x_{38}};$$

$$x_{\Sigma} = \frac{0,693 \cdot 0,1745}{0,693 + 0,1745} = 0,1394 \text{ Ом.}$$

В результате получится схема, представленная на рисунке 3.8.

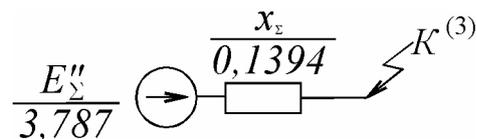


Рисунок 3.8

4) Начальное значение периодической слагающей тока короткого замыкания

$$I''_{нк} = \frac{E''_{\Sigma}}{x_{\Sigma}};$$

$$I''_{нк} = \frac{3,781}{0,1394} = 27,123 \text{ кА.}$$

5) Ударный ток короткого замыкания (мгновенное значение)

$$i_y = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I''_{нк},$$

где K_y - ударный коэффициент.

Ударный коэффициент принимается по данным, приведенным в [1, 6], или определяется по формуле

$$K_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}},$$

где T_a - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к.з.

$$T_a = \frac{x_{\Sigma}}{\omega \cdot R_{\Sigma}}$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 27,123 = 68,84 \text{ кА.}$$

Определять остаточное напряжение не нужно, т.к. нагрузка присоединена к точке к.з., $U_{ост_{к.з.}} = 0$, поэтому нагрузка будет заведомо генерировать ток к месту к.з.

3.2 Пример выполнения задания № 2

Методом типовых кривых определить периодическую слагающую тока трёх-фазного к.з. при к.з в точке $K^{(3)}$ и построить график её изменения во времени, $I_{нк}^{(3)} = f(t)$.

Расчёт ведётся в относительных единицах с приближенным приведением к одной ступени напряжения.

1) Составляется схема замещения для заданной расчётной схемы (рисунок 3.9).

2) выбираются базисные условия $S_{\bar{o}} = 100$ МВА и $U_{\bar{o}} = 230$ кВ, тогда

$$I_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}}};$$
$$I_{\bar{o}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,251 \text{ кА}$$

3) Рассчитываются сопротивления элементов схемы (расчёт ведётся в относительных единицах, знак «*» опускается).

Системы

$$x_1 = x_{C1} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{HC}};$$
$$x_1 = 0,3 \frac{100}{2500} = 0,012.$$

Автотрансформаторов Т-6, Т-7

$$x_2 = x_3 = x_{CT-6,7} = \frac{u_{KC} \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{HT}};$$
$$x_2 = x_3 = x_{CT-6,7} = 0, \text{ т.к. } u_{KC} = 0.$$
$$x_4 = x_5 = x_{BT-6,7} = \frac{u_{KB} \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{HT}};$$
$$x_4 = x_5 = x_{BT-6,7} = \frac{11,5\%}{100} \cdot \frac{100}{250} = 0,046$$

u_{KB} и u_{KC} взяты из расчётов задания №1.

Линий электропередач

$$x_6 = x_{W-1} = x_{nl} \cdot l_1 \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{cpl}^2};$$
$$x_6 = x_{W-1} = 0,4 \cdot 150 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,1134;$$

$$x_7 = x_8 = x_{W-2} = x_{nl} \cdot l_2 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cpl}^2};$$

$$x_7 = x_8 = x_{W-2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,0756;$$

$$x_9 = x_{W-3} = x_{nl} \cdot l_3 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cpl}^2};$$

$$x_9 = x_{W-3} = 0,4 \cdot 120 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,0907;$$

$$x_{10} = x_{W-4} = x_{nl} \cdot l_4 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cpl}^2};$$

$$x_{10} = x_{W-4} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,0378.$$

Трансформатора Т-1

$$x_{11} = x_{T-1} = \frac{u_{KB} \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{HT}};$$

$$x_{11} = x_{T-1} = \frac{11\%}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,1746$$

Генератора G-1

$$x_{12} = x_{G-1} = x_{d^*}'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{HT}};$$

$$x_{12} = x_{G-1} = 0,13 \cdot \frac{100}{62,5} = 0,208$$

Трансформаторов Т-4, Т-5

$$x_{13} = x_{14} = x_{BT-4,5} = \frac{u_{KB} \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{BT}};$$

$$x_{13} = x_{14} = x_{BT-4,5} = \frac{13\%}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,206;$$

$$x_{15} = x_{16} = x_{HT-4,5} = \frac{u_{KH} \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{HT}};$$

$$x_{15} = x_{16} = x_{HT-4,5} = \frac{11\%}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,1746;$$

u_{KB} и u_{KH} трансформаторов Т-4, Т-5 взяты из расчёта задания № 1.

Генератора G-2

$$x_{17} = x_{G-2} = x_{d^*}'' \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{HT}};$$

$$x_{17} = x_{G-2} = 0,22 \cdot \frac{100}{100} = 0,22.$$

Трансформаторов Т-2, Т-3

$$x_{18} = x_{19} = x_{BT-2,3} = \frac{u_{KB} \%}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{BT}};$$

$$x_{18} = x_{19} = x_{BT-2,3} = \frac{12\%}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,75;$$

Нагрузки Н-1

$$x_{20} = x_{OH^*}'' \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{HOH}};$$

$$x_{20} = 0,35 \cdot \frac{100}{22} = 1,591$$

Полученные результаты вносятся в схему замещения, приведенную на рисунке 3.9.

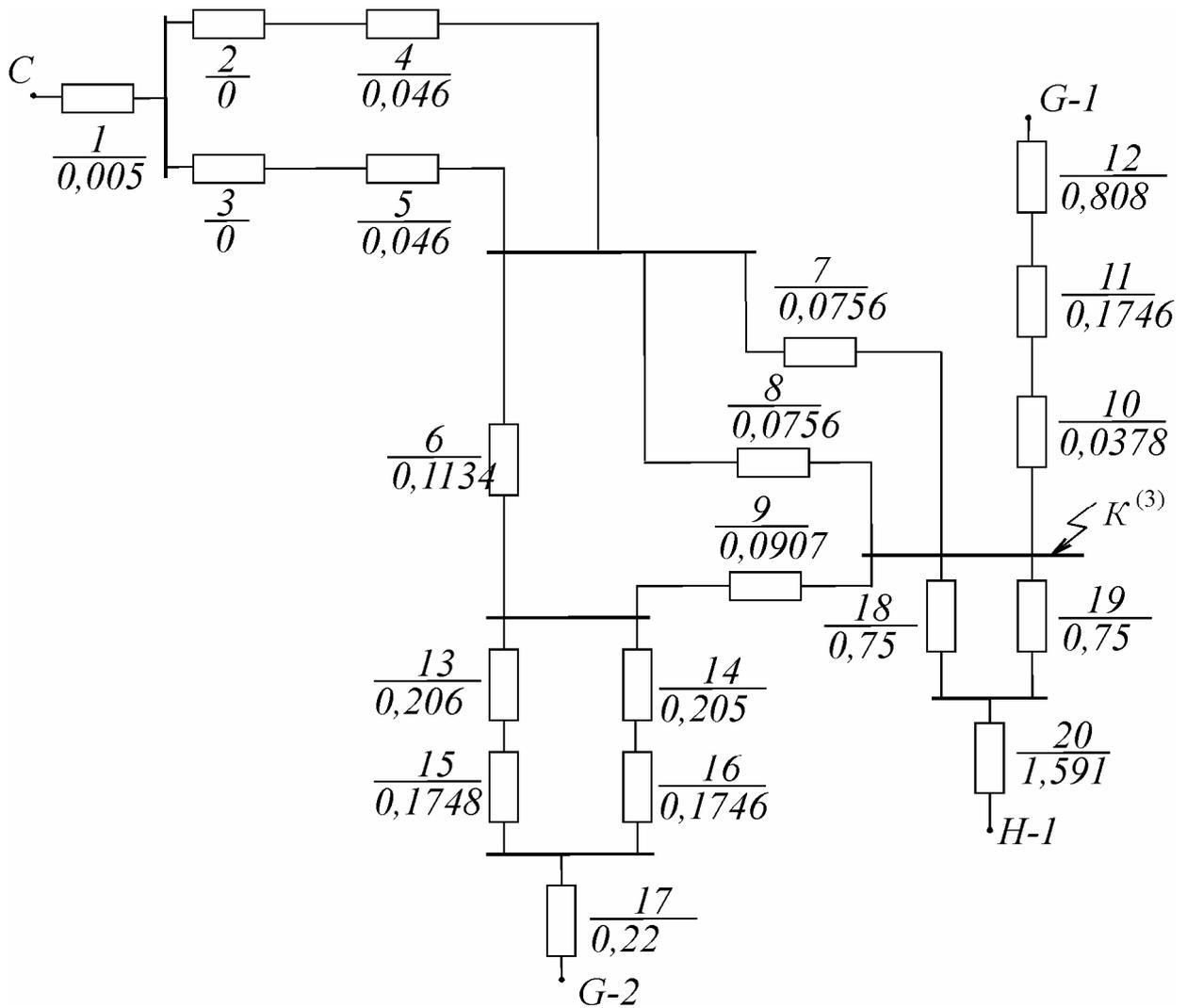


Рисунок 3.9

4) Преобразуется схема замещения и определяются взаимные сопротивления между источниками и точкой к.з.

$$x_{21} = x_{22} = x_{13} + x_{15};$$

$$x_{21} = x_{22} = 0,206 + 0,1746 = 0,3806;$$

$$x_{23} = x_{24} = x_2 + x_4;$$

$$x_{23} = x_{24} = 0 + 0,046 = 0,046;$$

$$x_{25} = \frac{x_7 \cdot x_8}{x_7 + x_8};$$

$$x_{25} = \frac{0,0756 \cdot 0,0756}{0,0756 + 0,0756} = 0,0378 ;$$

$$x_{26} = x_{10} + x_{11} + x_{12};$$

$$x_{26} = 0,0378 + 0,1746 + 0,208 = 0,4204$$

$$x_{27} = \frac{x_{18} \cdot x_{19}}{x_{18} + x_{19}};$$

$$x_{27} = \frac{0,75 \cdot 0,75}{0,75 + 0,75} = 0,375;$$

$$x_{28} = x_{27} + x_{20};$$

$$x_{28} = 0,375 + 1,591 = 1,966;$$

После преобразований получим схему (рисунок 3.10).

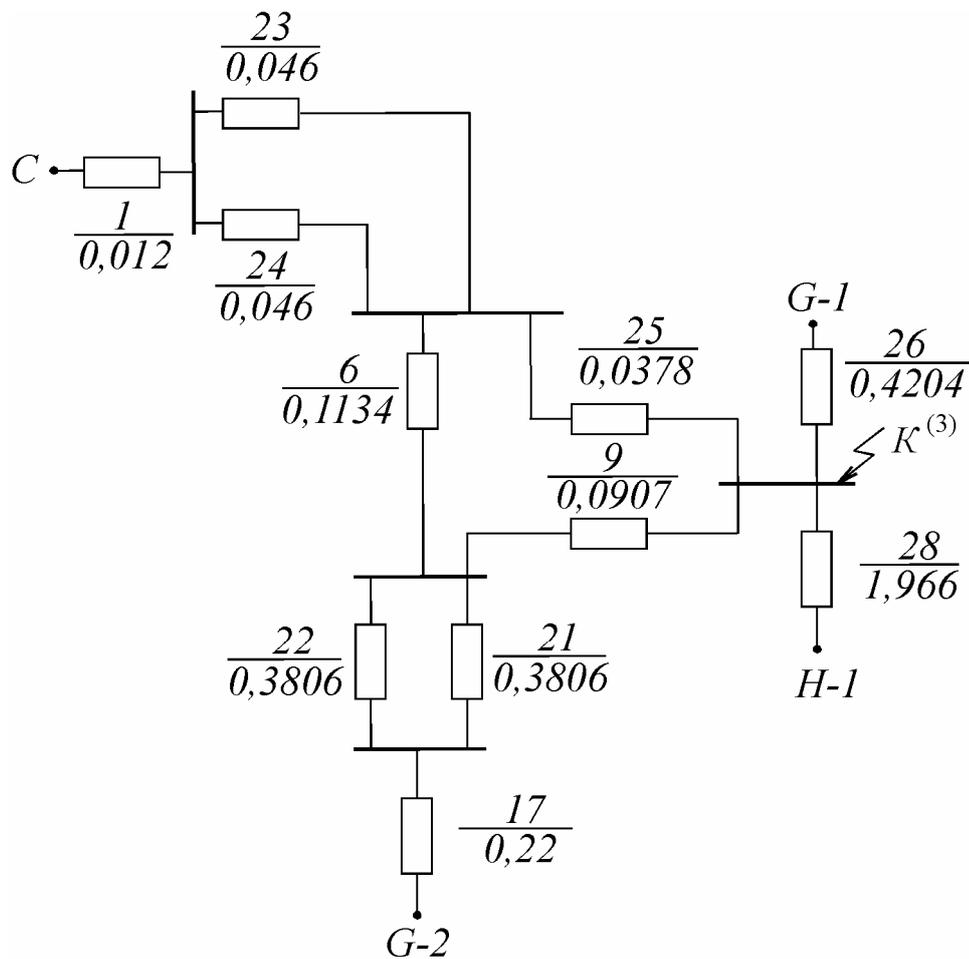


Рисунок 3.10

Дальнейшие преобразования очевидны:

$$x_{29} = \frac{x_{21} \cdot x_{22}}{x_{21} + x_{22}};$$

$$x_{29} = \frac{0,3806 \cdot 0,3806}{0,3806 + 0,3806} = 0,1903;$$

$$x_{30} = \frac{x_{23} \cdot x_{24}}{x_{23} + x_{24}};$$

$$x_{30} = \frac{0,046 \cdot 0,046}{0,046 + 0,046} = 0,023.$$

Треугольник сопротивлений 6-9-25 преобразуем в звезду с сопротивлениями 31-32-33

$$x_{31} = \frac{x_6 \cdot x_{25}}{x_6 + x_{25} + x_9};$$

$$x_{31} = \frac{0,1134 \cdot 0,0378}{0,1134 + 0,0378 + 0,0907} = 0,0177;$$

$$x_{32} = \frac{x_{25} \cdot x_9}{x_6 + x_{25} + x_9};$$

$$x_{32} = \frac{0,0378 \cdot 0,0907}{0,1134 + 0,0378 + 0,0907} = 0,0142;$$

$$x_{33} = \frac{x_9 \cdot x_6}{x_6 + x_{25} + x_9};$$

$$x_{33} = \frac{0,0907 \cdot 0,1134}{0,1134 + 0,0378 + 0,0907} = 0,0425$$

Получается схема, приведенная на рисунке 3.11.

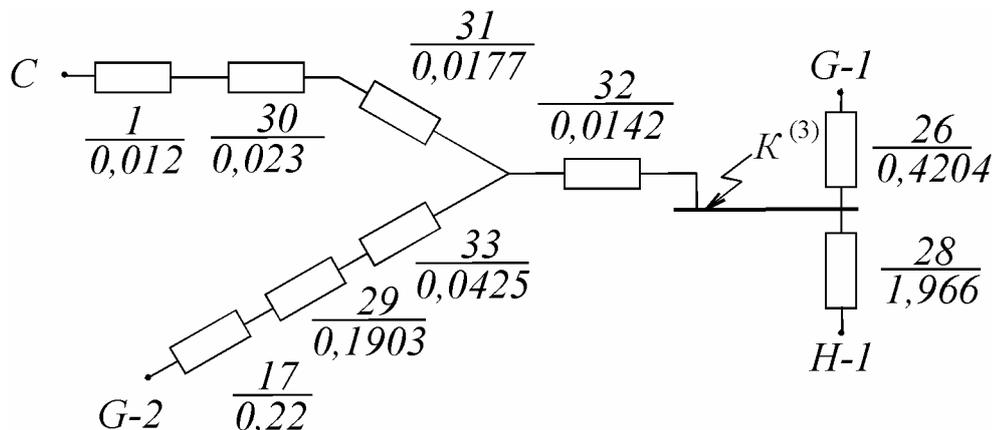


Рисунок 3.11

Дальнейшие преобразования очевидны

$$x_{34} = x_1 + x_{30} + x_{31};$$

$$x_{34} = 0,012 + 0,023 + 0,0177 = 0,0527;$$

$$x_{35} = x_{17} + x_{29} + x_{33};$$

$$x_{35} = 0,22 + 0,1903 + 0,0425 = 0,4528.$$

Схема приобретает вид, представленный на рисунке 3.12.

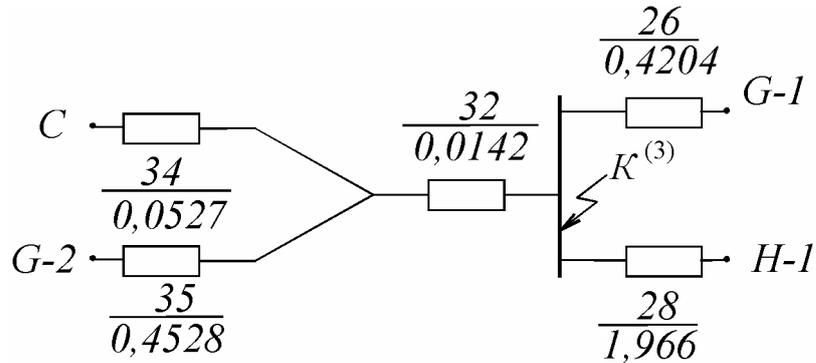


Рисунок 3.12

При расчёте методом типовых кривых разнотипные генераторы и система выделяются в отдельные ветви (рисунок 3.13).

$$x_{36} = x_{34} + x_{32} + \frac{x_{34} \cdot x_{32}}{x_{35}};$$

$$x_{36} = 0,0527 + 0,0142 + \frac{0,0527 \cdot 0,0142}{0,4528} = 0,0686;$$

$$x_{37} = x_{35} + x_{32} + \frac{x_{35} \cdot x_{32}}{x_{34}};$$

$$x_{37} = 0,4528 + 0,0142 + \frac{0,4528 \cdot 0,0142}{0,0527} = 0,589$$

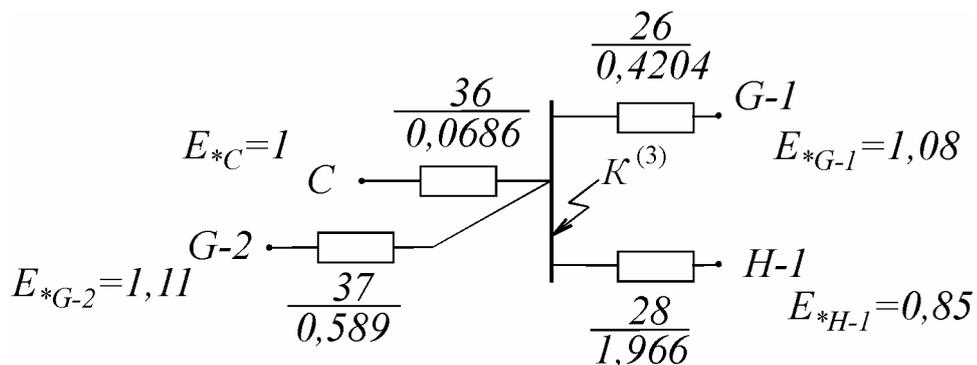


Рисунок 3.13

На этом рисунке каждый из источников связан с точкой к.з. по радиальной схеме.

5) Начальное значение тока к.з. в относительных единицах для каждого из генераторов определяется по формуле

$$I_{*nk0_i} = \frac{E_{*0i}}{x_{*i}}.$$

Значения э.д.с. источников в относительных единицах взяты из предыдущих расчетов (см. задание №1):

$$E_{*c} = 1;$$

$$E_{*G-1} = 1,08 ;$$

$$E_{*G-2} = 1,11 ;$$

$$E_{*H-1} = 0,85 .$$

Определяются токи I_{*nk0} для каждого из источников:

- для системы

$$I_{*nk0c} = \frac{1}{0,0686} = 14,577 ;$$

- для генератора G-1

$$I_{*nk0_{G-1}} = \frac{1,08}{0,4204} = 2,569 ;$$

- для генератора G-2

$$I_{*nk0_{G-2}} = \frac{1,11}{0,589} = 1,8846 ;$$

- для нагрузки H-1

$$I_{*nk0_{H-1}} = \frac{0,85}{1,966} = 0,432 .$$

б) Определяется электрическая удаленность точки к.з. от этих источников по формуле

$$I_{*nk0_i(ном)} = \frac{I_{n0_i}}{I_{ном_i}} = I_{*n0(\bar{\sigma})} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}}$$

Для системы удаленность не определяется, так как ее мощность велика по отношению к нагрузке, поэтому ток к.з. от системы будет одинаков для любого момента времени

$$I_{nk0c} = I_{nk\infty c} = const = I_{*nk0c} \cdot I_{\bar{\sigma}} ;$$

$$I_{nk0c} = 14,577 \cdot 0,251 = 3,659 \text{ кА} ;$$

- для генератора G-1

$$I_{*nk0_{G-1}(ном)} = 2,569 \cdot \frac{100}{62,5} = 4,11 ;$$

- для генератора G-2

$$I_{*nk0_{G-2}(ном)} = 1,8846 \cdot \frac{100}{100} = 1,8846 \text{ кА} ;$$

- для нагрузки Н-1 ток к.з. определяется только для момента времени $t = 0$ ввиду быстрого его затухания

$$I_{nk0_{H-1}} = I_{*nk0_{H-1}} \cdot I_{\bar{\sigma}} ;$$

$$I_{nk0_{H-1}} = 0,432 \cdot 0,25 = 0,108 .$$

Согласно [5] генератор G-1 имеет небольшую удаленность от точки к.з. ($I_{*nk0_{G-1}(ном)} > 2$), поэтому ток к.з. будет изменяться в зависимости от времени. Это изменение определяется по формуле

$$I_{nkt} = \gamma_t \cdot I_{nk0} ,$$

где γ_t - кратность тока к.з. в расчетный момент времени.

γ_t находится по кривой (рисунок 5.1 [5]).

Значения γ_t для различных моментов времени для генератора G-1, а также токи к.з. для этих же моментов времени приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения γ_t и токов к.з. для моментов времени t

t, c	0	0,1	0,2	0,3	0,4	∞
γ_t	1,0	0,8	0,725	0,7	0,68	0,67
I_{*nkt}	2,569	2,055	1,863	1,798	1,747	1,721
I_{nkt}, kA	0,645	0,516	0,467	0,451	0,438	0,432

Для генератора $G-2$ ($I_{*nk0_{G-2}(ном)} < 2$), поэтому для него короткое замыкание считается удаленным и ток к.з. для любого момента времени будет один и тот же

$$I_{nk0_{G-2}} = I_{nk\infty_{G-2}} = const = I_{*nk0_{G-2}} \cdot I_b ;$$

$$I_{nk0_{G-2}} = 1,8846 \cdot 0,251 = 0,473 \text{ кА} ;$$

7) Суммарный ток периодической слагающей к.з. для различных моментов времени определяется по формуле

$$I_{nkt_{\Sigma}} = I_{nkt_C} + I_{nkt_{G-1}} + I_{nkt_{G-2}} + I_{nkt_{H-1}} .$$

Результаты расчета представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Суммарный ток периодической слагающей $I_{nkt_{\Sigma}}$ для моментов времени t

Значения тока в кА

t, c	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
I_{nkt_C}	3,6590					
$I_{nkt_{G-1}}$	0,645	0,516	0,467	0,451	0,438	0,432
$I_{nkt_{G-2}}$	0,473					
$I_{nkt_{H-1}}$	0,108	0				
$I_{nkt_{\Sigma}}$	4,885	4,648	4,599	4,583	4,57	4,564

График изменения периодической слагающей тока к.з. представлен на рисунке 3.14.

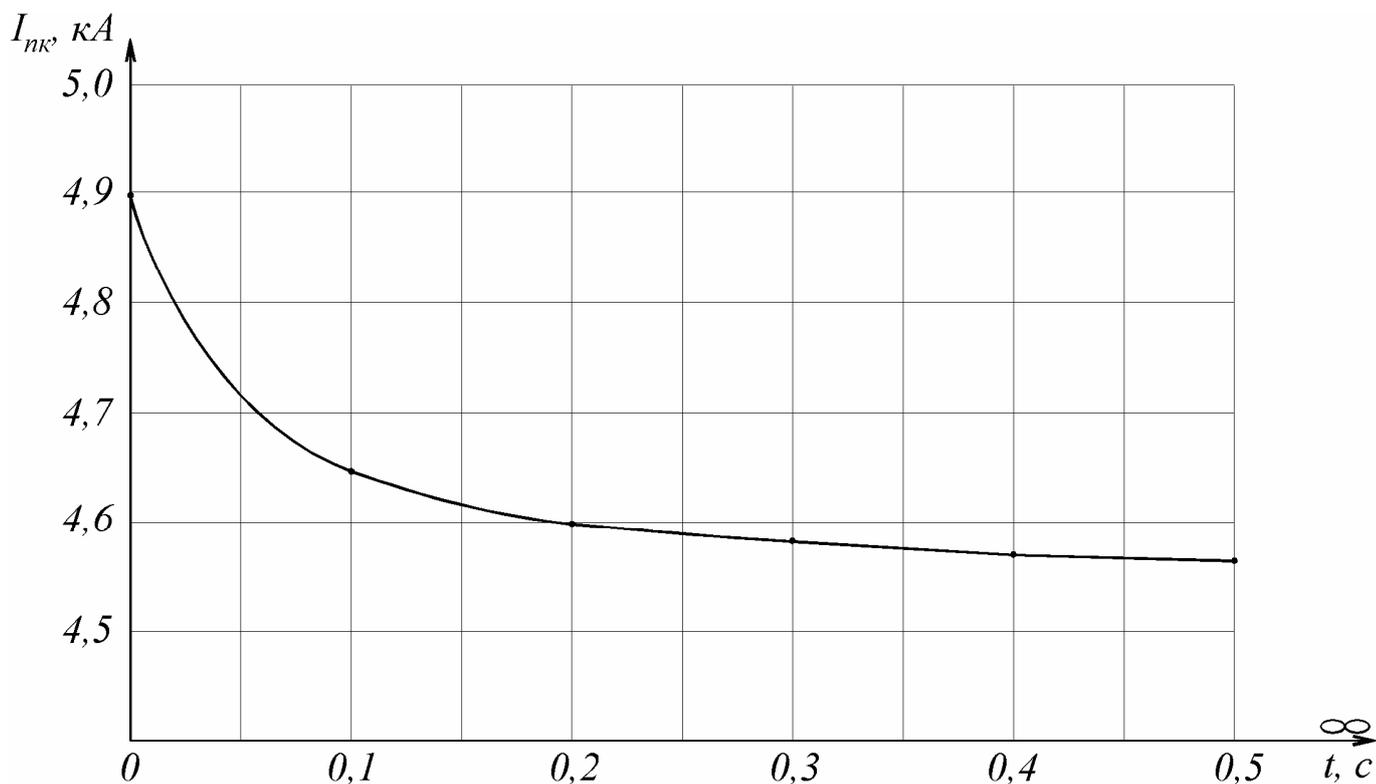


Рисунок 3.14

3.3 Пример выполнения задания № 3

Аналитическим путём определить начальное значение тока при однофазном к.з. в точке $K^{(I)}$.

1) Составляется схема замещения прямой последовательности (рисунок 3.15). Параметры элементов схемы выражаются в именованных единицах с приближенным приведением к одной ступени (коэффициенты трансформации считаются по средним номинальным напряжениям). За основную (базисную) выбирается ступень, где рассматривается к.з., $U_{\delta} = U_{к.з.} = 230$ кВ.

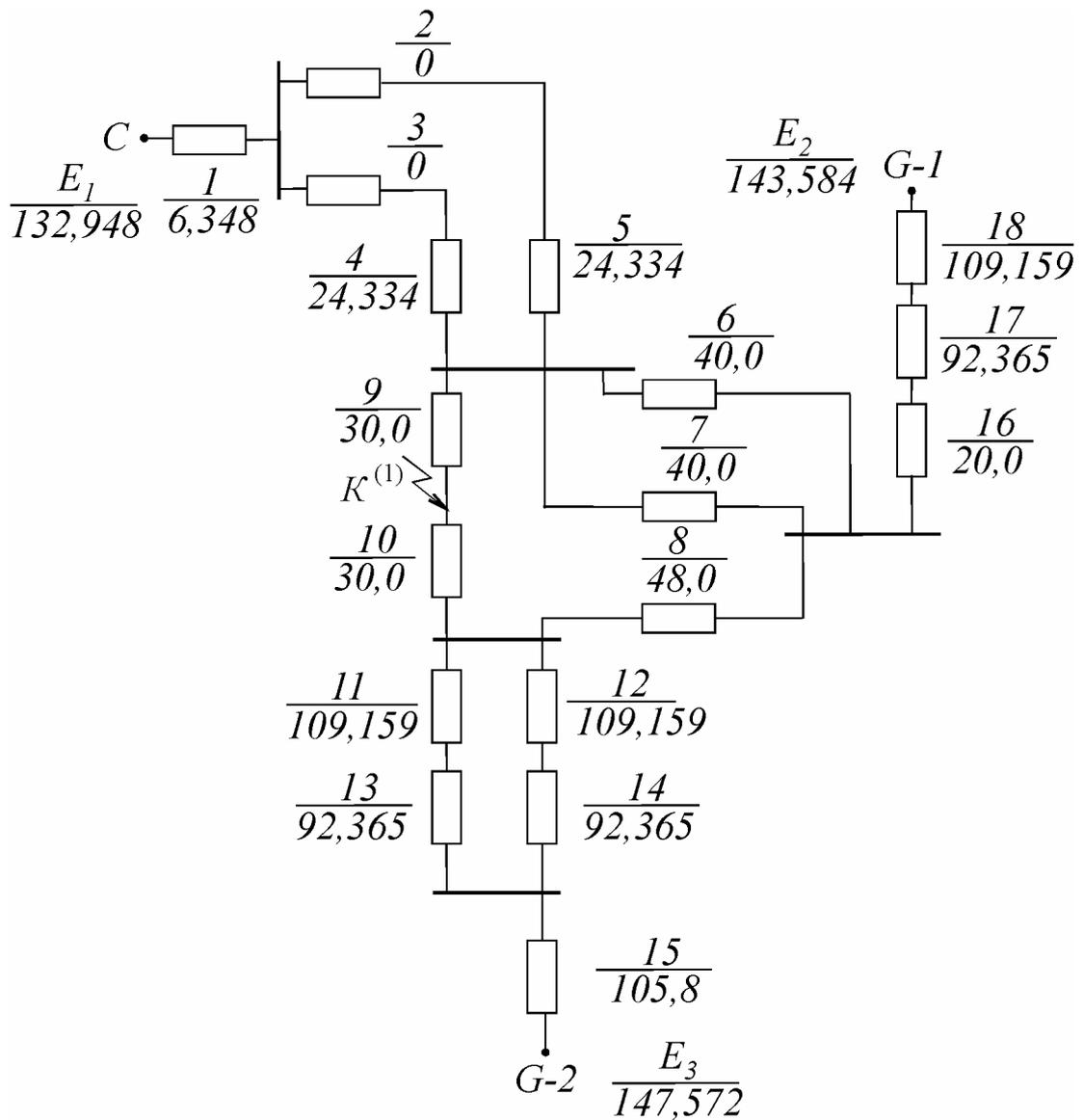


Рисунок 3.15

2) Рассчитываются сопротивления элементов схемы замещения, представленной на рисунке 3.15.

Системы:

$$x_1 = x_{*C1} \cdot \frac{U_6^2}{S_{НС}};$$

$$x_1 = 0,3 \cdot \frac{230^2}{2500} = 6,348 \text{ Ом.}$$

Трансформаторов и автотрансформаторов

Т-6, Т-7

$$x_2 = x_3 = \frac{u_{kc} \%}{100} \cdot \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{HT}};$$

$$x_2 = x_3 = 0, \text{ так как } u_{kc} = 0;$$

$$x_4 = x_5 = \frac{u_{kc} \%}{100} \cdot \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{HT}};$$

$$x_4 = x_5 = \frac{u_{kb} \%}{100} \cdot \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{HT}};$$

$$x_4 = x_5 = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{230^2}{250} = 24,344$$

u_{kc} и u_{kb} взяты из задания № 1.

Т-4, Т-6

$$x_{11} = x_{12} = \frac{u_{kb} \%}{100} \cdot \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{HT}};$$

$$x_{11} = x_{12} = \frac{13\%}{100} \cdot \frac{230^2}{63} = 109,59 \text{ Ом};$$

$$x_{13} = x_{14} = \frac{u_{kH} \%}{100} \cdot \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{HT}};$$

$$x_{13} = x_{14} = \frac{11\%}{100} \cdot \frac{230^2}{63} = 92,365 \text{ Ом};$$

u_{kb} и u_{kH} взяты из задания № 1.

Т-1

$$x_{17} = \frac{z_k \%}{100} \cdot \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{HT}};$$

$$x_{17} = \frac{11\%}{100} \cdot \frac{230^2}{63} = 92,365 \text{ Ом};$$

Генераторов

$$x_{15} = x_{G-2} = x_{d^*} \cdot \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{H2}};$$

$$x_{15} = 0,2 \cdot \frac{230^2}{100} = 105,8 \text{ Ом};$$

$$x_{18} = x_{G-1} = x_{d^*} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{нз}};$$

$$x_{18} = 0,13 \cdot \frac{230^2}{62,5} = 110,032 \text{ Ом};$$

Линий электропередач:

$$x_6 = x_7 = x_{W-2} = x_{нл} \cdot l_{W-2};$$

$$x_6 = x_7 = x_{W-2} = 0,4 \cdot 100 = 40 \text{ Ом};$$

$$x_8 = x_{W-3} = x_{нл} \cdot l_{W-3};$$

$$x_8 = x_{W-3} = 0,4 \cdot 120 = 48 \text{ Ом};$$

$$x_9 = x_{10} = \frac{1}{2} x_{W-1} = \frac{1}{2} x_{нл} \cdot l_{W-1};$$

$$x_9 = x_{10} = \frac{1}{2} x_{W-1} = \frac{1}{2} 0,4 \cdot 150 = 30 \text{ Ом};$$

$$x_{16} = x_{W-4} = x_{нл} \cdot l_{W-4};$$

$$x_{16} = x_{W-4} = 0,4 \cdot 50 = 20 \text{ Ом};$$

3) Определяются фазные э.д.с. источников питания

- для системы

$$E_1 = E_{*C} \cdot \frac{U_{нсп}}{\sqrt{3}} \cdot k_{T6};$$

$$E_1 = 1,0 \cdot \frac{115}{\sqrt{3}} \cdot \frac{230}{115} = 132,948 \text{ кВ};$$

- для генератора G-1

$$E_2 = E_{*G-1} \cdot \frac{U_{нсп}}{\sqrt{3}} \cdot k_{T1};$$

$$E_2 = 1,08 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} \cdot \frac{230}{6,3} = 143,58 \text{ кВ};$$

- для генератора G-2

$$E_3 = E_{*G-2} \cdot \frac{U_{нсп}}{\sqrt{3}} \cdot k_{T4} ;$$

$$E_2 = 1,11 \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} \cdot \frac{230}{13,8} = 147,57 \text{ кВ};$$

$E_{*C} = 1$; $E_{*G-1} = 1,08$ и $E_{*G-2} = 1,11$ взяты из [6].

Полученные величины сопротивлений и э.д.с. вносятся в схему замещения прямой последовательности, показанную на рис.3.15.

4) Для определения $x_{1\Sigma}$ схема замещения приводится к простейшему виду:

$$x_{19} = x_2 + x_5 ;$$

$$x_{19} = 0 + 24,334 = 24,334 \text{ Ом} ;$$

$$x_{20} = x_3 + x_4 ;$$

$$x_{20} = 0 + 24,334 = 24,334 \text{ Ом} ;$$

$$x_{21} = \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7} ;$$

$$x_{21} = \frac{40 \cdot 40}{40 + 40} = 20 \text{ Ом} ;$$

$$x_{22} = x_{23} = x_{11} + x_{13} ;$$

$$x_{22} = x_{23} = 109,159 + 92,365 = 201,524 \text{ Ом} ;$$

$$x_{24} = x_{16} + x_{17} + x_{18} ;$$

$$x_{24} = 20 + 92,365 + 110,032 = 222,397 \text{ Ом} ;$$

После данных преобразований получится схема, показанная на рисунке 3.16.

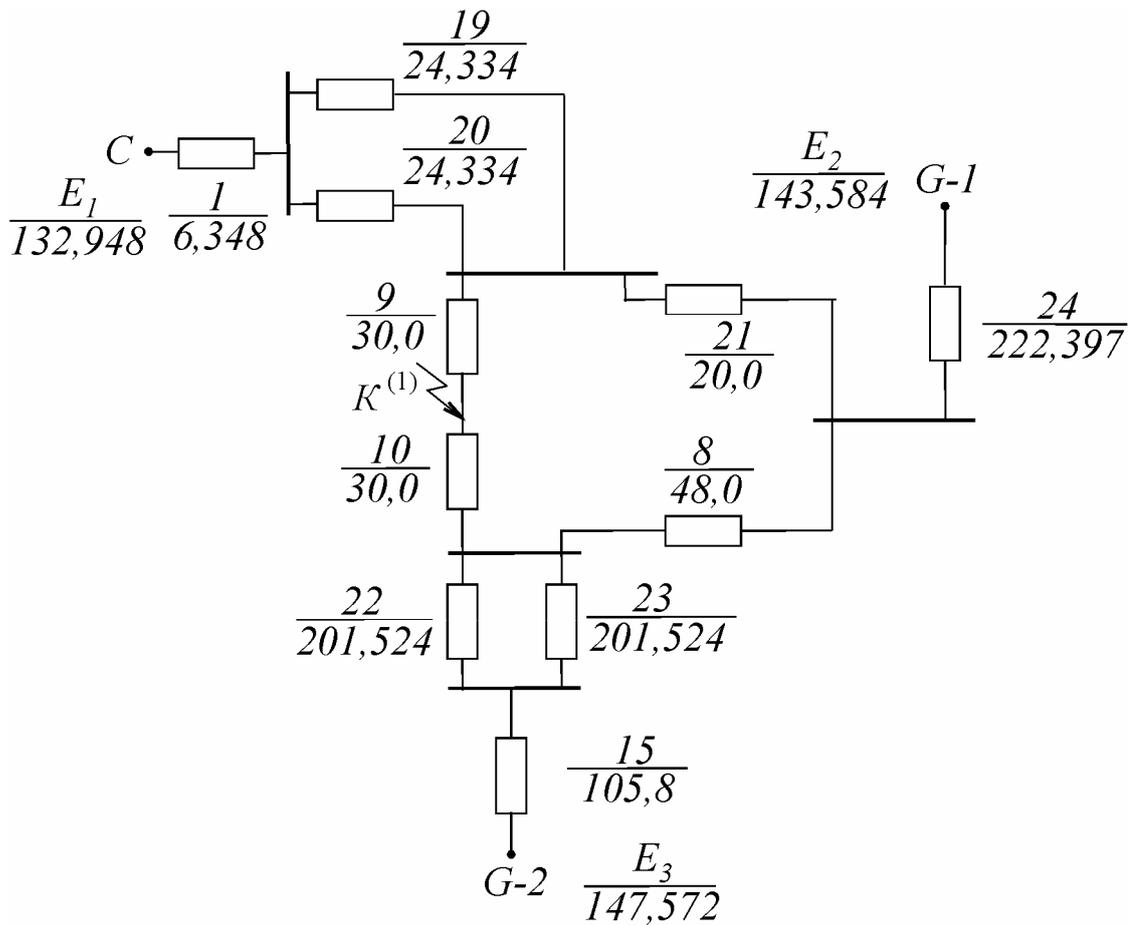


Рисунок 3.16

Звезда с сопротивлениями 21-24-8 преобразуется в треугольник сопротивлений 25-26-27

$$x_{25} = x_{21} + x_{24} + \frac{x_{21} \cdot x_{24}}{x_8};$$

$$x_{25} = 20 + 222,397 + \frac{20 \cdot 222,397}{48} = 335,062 \text{ Ом};$$

$$x_{26} = x_{24} + x_8 + \frac{x_{24} \cdot x_8}{x_{21}};$$

$$x_{26} = 222,397 + 48 + \frac{222,397 \cdot 48}{20} = 804,15 \text{ Ом};$$

$$x_{27} = x_8 + x_{21} + \frac{x_8 \cdot x_{21}}{x_{24}};$$

$$x_{27} = 48 + 20 + \frac{48 \cdot 20}{222,397} = 72,317 \text{ Ом};$$

$$x_{28} = \frac{x_{19} \cdot x_{20}}{x_{19} + x_{20}};$$

$$x_{28} = \frac{24,334 \cdot 24,334}{24,334 + 24,334} = 12,167 \text{ Ом};$$

$$x_{29} = x_1 + x_{28};$$

$$x_{29} = 6,348 + 12,167 = 18,515 \text{ Ом};$$

$$x_{30} = \frac{x_{22} \cdot x_{23}}{x_{22} + x_{23}};$$

$$x_{30} = \frac{201,524 \cdot 2014,524}{201,524 + 201,524} = 100,762 \text{ Ом};$$

$$x_{31} = x_{15} + x_{30};$$

$$x_{31} = 105,8 + 100,762 = 206,562 \text{ Ом};$$

Получится схема, показанная на рисунке 3.17.

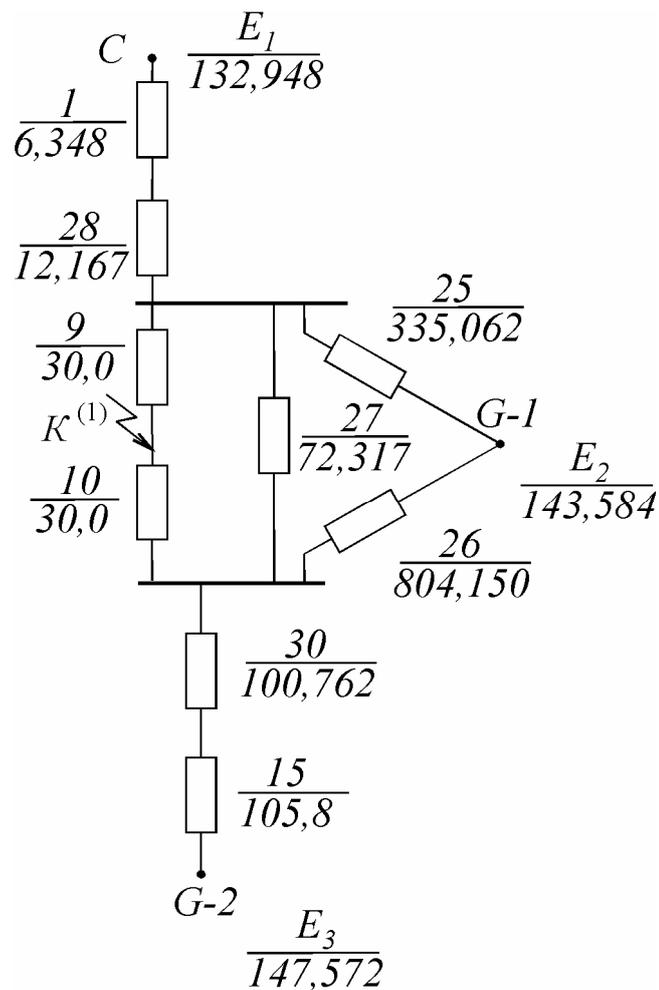


Рисунок 3.17

Треугольник с сопротивлениями 9-10-27 преобразуется в звезду сопротивлений 32-33-34

$$x_{32} = \frac{x_9 \cdot x_{27}}{x_9 + x_{10} + x_{27}};$$

$$x_{32} = \frac{30 \cdot 72,317}{30 + 30 + 72,317} = 16,396 \text{ Ом};$$

$$x_{33} = \frac{x_{10} \cdot x_{27}}{x_9 + x_{10} + x_{27}};$$

$$x_{33} = \frac{30 \cdot 72,317}{30 + 30 + 72,317} = 16,396 \text{ Ом};$$

$$x_{34} = \frac{x_9 \cdot x_{10}}{x_9 + x_{10} + x_{27}};$$

$$x_{34} = \frac{30 \cdot 30}{30 + 30 + 72,317} = 6,802 \text{ Ом};$$

В результате получится схема (рисунок 3.18).

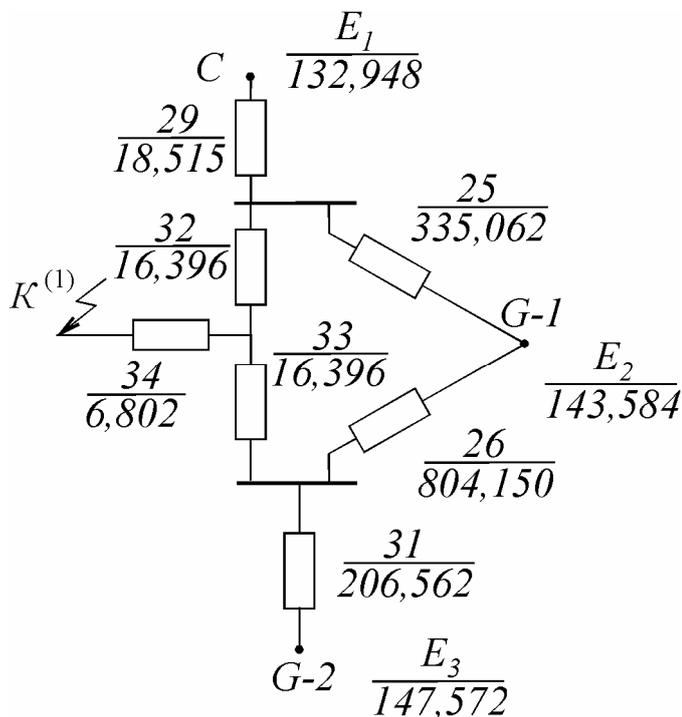


Рисунок 3.18

Для упрощения дальнейшего преобразования воспользуемся расщеплением схемы в узле G-1 (рисунок 3.19).

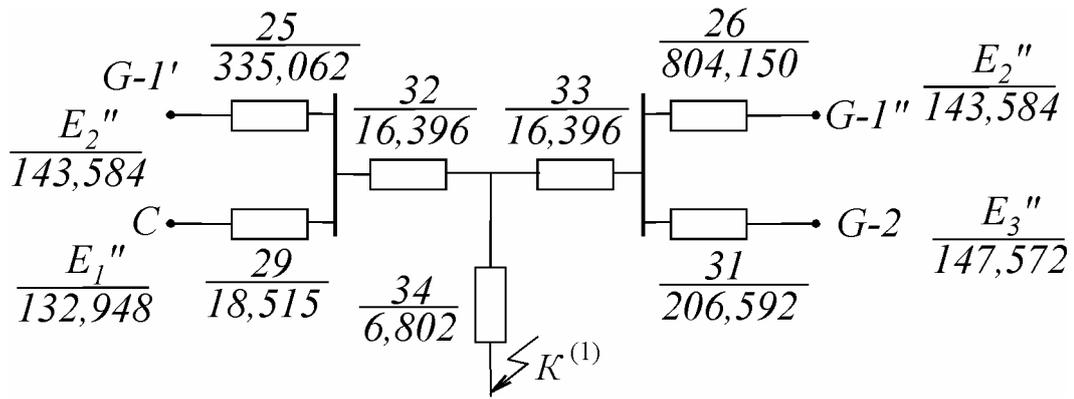


Рисунок 3.19

Произведем дальнейшие преобразования схемы

$$x_{35} = \frac{x_{25} \cdot x_{29}}{x_{25} + x_{29}};$$

$$x_{35} = \frac{335,062 \cdot 18,15}{335,062 + 18,15} = 17,545 \text{ Ом};$$

$$x_{36} = \frac{x_{26} \cdot x_{31}}{x_{26} + x_{31}};$$

$$x_{36} = \frac{804,15 \cdot 206,592}{804,15 + 206,592} = 164,365 \text{ Ом};$$

$$x_{37} = x_{35} + x_{32};$$

$$x_{37} = 17,545 + 16,396 = 33,941 \text{ Ом};$$

$$x_{38} = x_{36} + x_{33};$$

$$x_{38} = 164,365 + 16,396 = 180,761 \text{ Ом};$$

$$E_2' = E_2'' = E_2 = 143,584 \text{ кВ};$$

$$E_4 = \frac{E_1 \cdot x_{25} + E_2 \cdot x_{29}}{x_{25} + x_{29}};$$

$$E_4 = \frac{132,948 \cdot 335,062 + 143,584 \cdot 18,515}{336,062 + 18,15} = 133,505 \text{ кВ};$$

$$E_5 = \frac{E_3 \cdot x_{26} + E_2'' \cdot x_{31}}{x_{26} + x_{31}};$$

$$E_5 = \frac{147,572 \cdot 804,15 + 143,584 \cdot 206,592}{804,15 + 206,592} = 146,757 \text{ кВ};$$

После этого получится схема, показанная на рисунке 3.20.

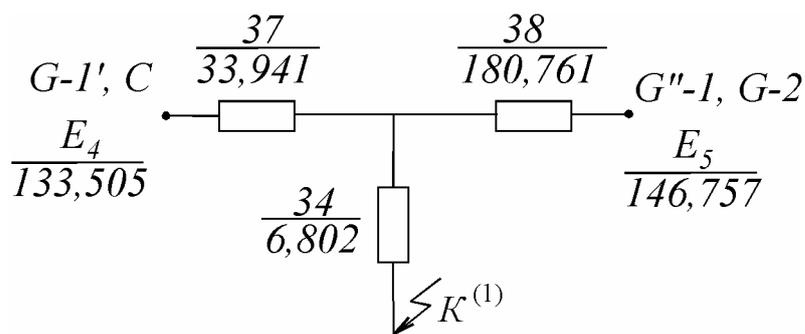


Рисунок 3.20

$$x_{39} = \frac{x_{37} \cdot x_{38}}{x_{37} + x_{38}};$$

$$x_{39} = \frac{33,941 \cdot 180,761}{33,941 + 180,761} = 28,575 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление схемы прямой последовательности

$$x_{1\Sigma} = x_{39} + x_{34};$$

$$x_{1\Sigma} = 28,575 + 6,802 = 35,377 \text{ Ом}.$$

Эквивалентная э.д.с. прямой последовательности

$$E_{\Sigma} = \frac{E_4 \cdot x_{38} + E_5 \cdot x_{37}}{x_{37} + x_{38}};$$

$$E_{\Sigma} = \frac{133,505 \cdot 180,761 + 146,757 \cdot 33,941}{180,761 + 33,941} = 135,6 \text{ кВ};$$

Схема обратной последовательности не составляется, так как в приближённых практических расчётах можно принимать

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

поскольку точка к.з. удалена от обоих генераторов.

Схема нулевой последовательности составляется, исходя из принятых режимов нейтралей трансформаторов (см. исходную расчётную схему на рисунке 3.1) и местоположения точки к.з. $K^{(1)}$. Схема замещения нулевой последовательности приведена на рисунке 3.21.

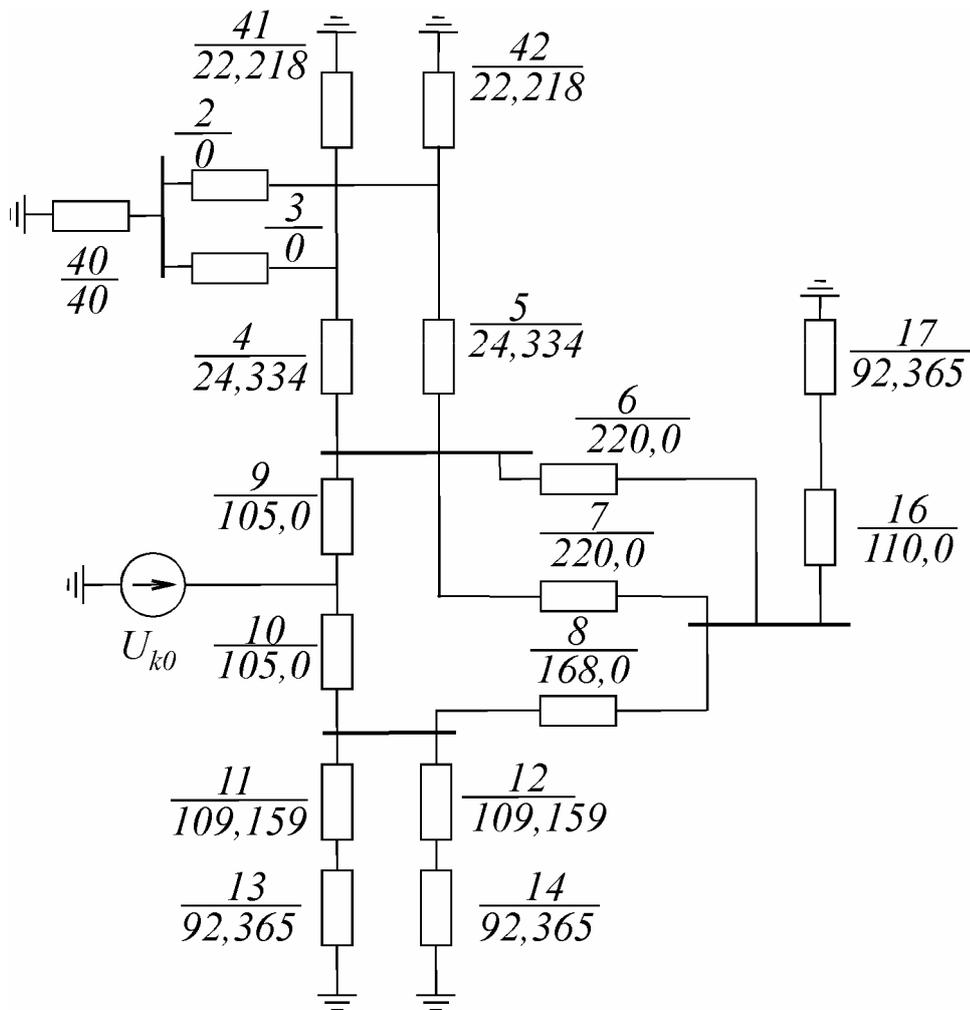


Рисунок 3.21

Рассчитываются сопротивления нулевой последовательности линий и трансформаторов. При определении сопротивлений нулевой последовательности воздушных линий принимается, что линии без тросов (или что трос заземлён через пробивной предохранитель), тогда $x_0 = 3,5 \cdot x_1$ для одноцепных линий и $x_0 = 5,5 \cdot x_1$ для двухцепных линий, согласно [6] и данным методическим указаниям (с. 21, 22).

Сопротивление воздушных линий

$$x_6 = x_7 = 0,4 \cdot 100 \cdot 5,5 = 220 \text{ Ом ;}$$

$$x_8 = 0,4 \cdot 120 \cdot 3,5 = 168 \text{ Ом ;}$$

$$x_9 = x_{10} = 0,4 \cdot \frac{150}{2} \cdot 3,5 = 105 \text{ Ом ;}$$

$$x_{16} = 0,4 \cdot 50 \cdot 5,5 = 110 \text{ Ом ;}$$

Сопротивление системы

$$x_{40} = x_{c0} \cdot k_{T-6}^2 ;$$

$$x_{40} = 10 \cdot \frac{230^2}{115} = 40 \text{ Ом} .$$

Сопротивления трансформаторов Т-6 и Т-7

$$x_{41} = x_{42} = \frac{u_{кн} \%}{100} \cdot \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{HT}} ;$$

$$x_{41} = x_{42} = \frac{105\%}{100} \cdot \frac{230^2}{250} = 22,218 \text{ Ом},$$

$u_{кн} \%$ взято из задания № 1.

Для остальных элементов $x_0 = x_1$. Полученные величины сопротивления вносятся в схему замещения нулевой последовательности, показанную на рисунке 3.21.

Для определения $x_{0\Sigma}$ преобразовывается схема нулевой последовательности.

$$x_{43} = \frac{x_2 \cdot x_3}{x_2 + x_3} ;$$

$$x_{43} = \frac{0 \cdot 0}{0 + 0} = 0 \text{ Ом} ;$$

$$x_{44} = \frac{x_4 \cdot x_5}{x_4 + x_5} ;$$

$$x_{44} = \frac{24,334 \cdot 24,334}{24,334 + 24,334} = 12,167 \text{ Ом} ;$$

$$x_{45} = \frac{x_{41} \cdot x_{42}}{x_{41} + x_{42}} ;$$

$$x_{45} = \frac{22,218 \cdot 22,218}{22,218 + 22,218} = 11,109 \text{ Ом} ;$$

$$x_{46} = x_{11} + x_{13} ;$$

$$x_{46} = 109,159 + 92,365 = 201,524 \text{ Ом} ;$$

$$x_{47} = x_{12} + x_{14} ;$$

$$x_{47} = 109,159 + 92,365 = 201,524 \text{ Ом} ;$$

$$x_{48} = \frac{x_{46} \cdot x_{47}}{x_{46} + x_{47}};$$

$$x_{48} = \frac{201,524 \cdot 201,524}{201,524 + 201,524} = 100,762 \text{ Ом};$$

$$x_{49} = \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7};$$

$$x_{49} = \frac{220 \cdot 220}{220 + 220} = 110 \text{ Ом};$$

$$x_{50} = x_{40} + x_{43};$$

$$x_{50} = 40 + 0 = 40 \text{ Ом};$$

$$x_{51} = x_{16} + x_{17};$$

$$x_{51} = 110 + 92,365 = 202,365 \text{ Ом}$$

Получится схема, показанная на рисунке 3.22.

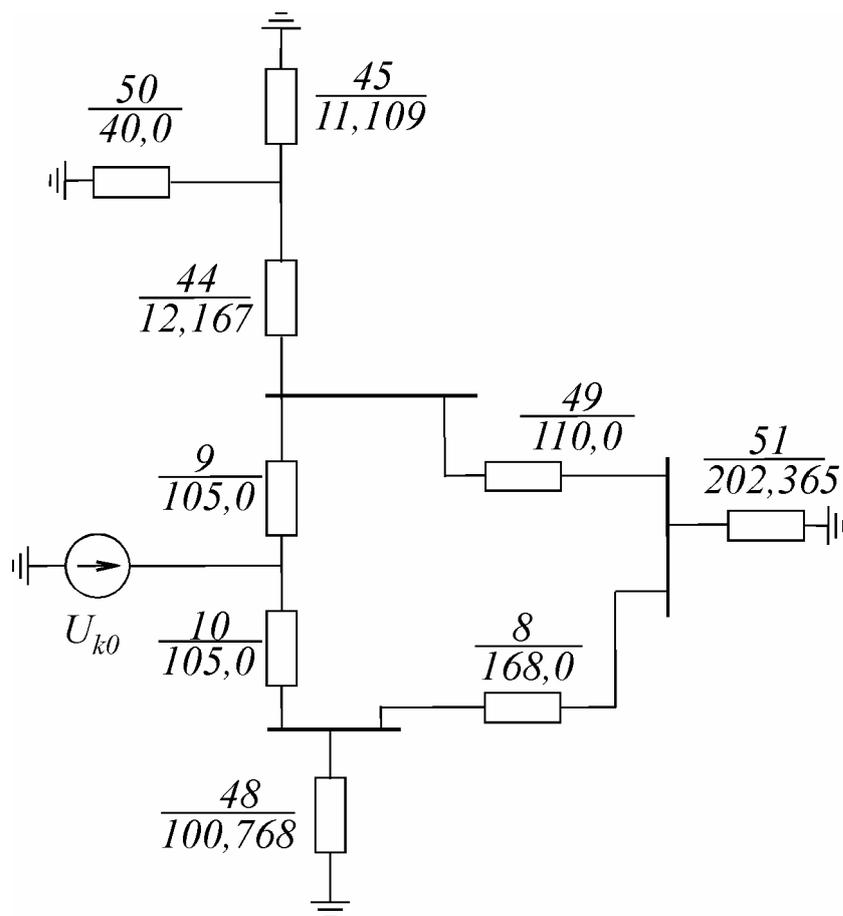


Рисунок 3.22

Дальнейшие преобразования очевидны

$$x_{52} = \frac{x_{50} \cdot x_{45}}{x_{50} + x_{45}};$$

$$x_{52} = \frac{40 \cdot 11,109}{40 + 11,109} = 8,694 \text{ Ом};$$

$$x_{53} = x_{52} + x_{44};$$

$$x_{53} = 8,694 + 12,167 = 20,861 \text{ Ом}$$

Преобразуется звезда 51-49-8 в треугольник 54-55-56

$$x_{54} = x_{49} + x_{51} + \frac{x_{49} \cdot x_{51}}{x_8};$$

$$x_{54} = 110 + 202,365 + \frac{110 \cdot 202,365}{168} = 444,866 \text{ Ом};$$

$$x_{55} = x_{51} + x_8 + \frac{x_{51} \cdot x_8}{x_{49}};$$

$$x_{55} = 202,365 + 168 + \frac{202,365 \cdot 168}{110} = 679,432 \text{ Ом};$$

$$x_{56} = x_8 + x_{49} + \frac{x_8 \cdot x_{49}}{x_{51}};$$

$$x_{56} = 168 + 110 + \frac{168 \cdot 110}{202,365} = 369,32 \text{ Ом};$$

Получится схема, (рисунок 3.23).

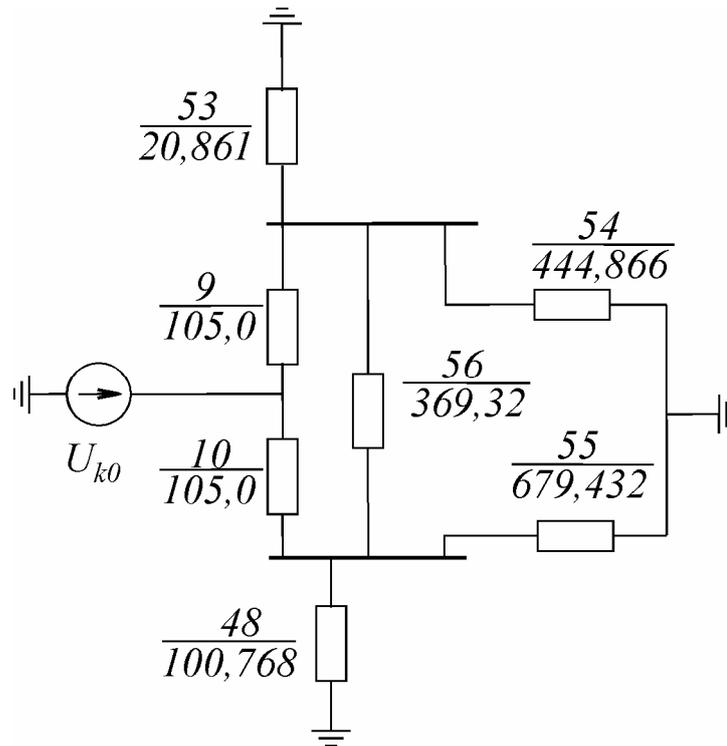


Рисунок 3.23

Дальнейшие преобразования аналогичны преобразованиям схемы прямой последовательности. Преобразуется треугольник в 9-10-56 в звезду 57-58-59.

$$x_{57} = \frac{x_9 \cdot x_{56}}{x_9 + x_{10} + x_{56}};$$

$$x_{57} = \frac{105 \cdot 369,32}{105 + 105 + 369,32} = 66,938 \text{ Ом};$$

$$x_{58} = \frac{x_{10} \cdot x_{56}}{x_9 + x_{10} + x_{56}};$$

$$x_{58} = \frac{105 \cdot 369,32}{105 + 105 + 369,32} = 66,938 \text{ Ом};$$

$$x_{59} = \frac{x_9 \cdot x_{10}}{x_9 + x_{10} + x_{56}};$$

$$x_{59} = \frac{105 \cdot 105}{105 + 105 + 369,32} = 19,031 \text{ Ом};$$

В результате получится схема, рисунок 3.24.

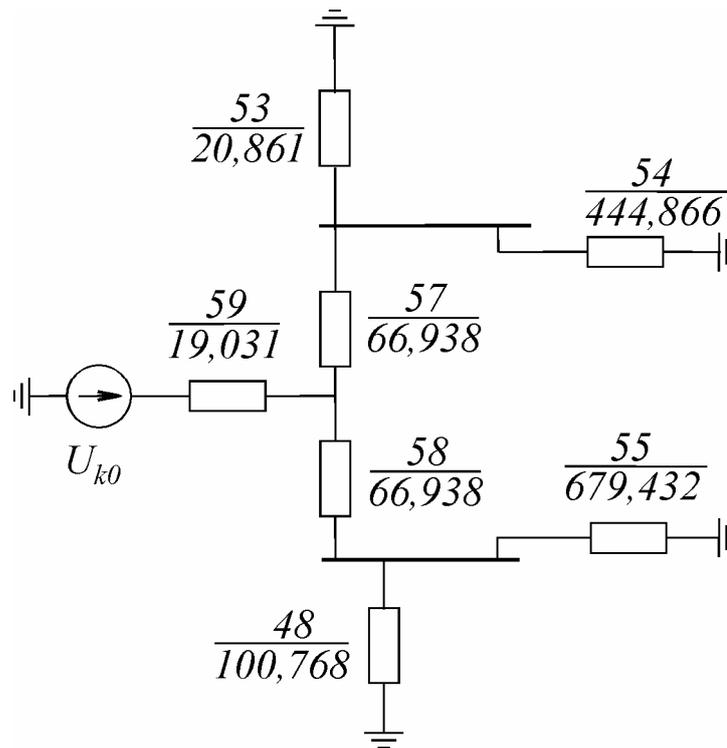


Рисунок 3.24

$$x_{60} = \frac{x_{53} \cdot x_{54}}{x_{53} + x_{54}};$$

$$x_{60} = \frac{20,361 \cdot 444,86}{20,361 + 444,86} = 19,47 \text{ Ом};$$

$$x_{61} = \frac{x_{48} \cdot x_{55}}{x_{48} + x_{55}};$$

$$x_{61} = \frac{100,762 \cdot 679,938}{100,762 + 679,938} = 87,749 \text{ Ом};$$

Дальнейшие преобразования очевидны и представлены на рисунках 3.25 – 3.32

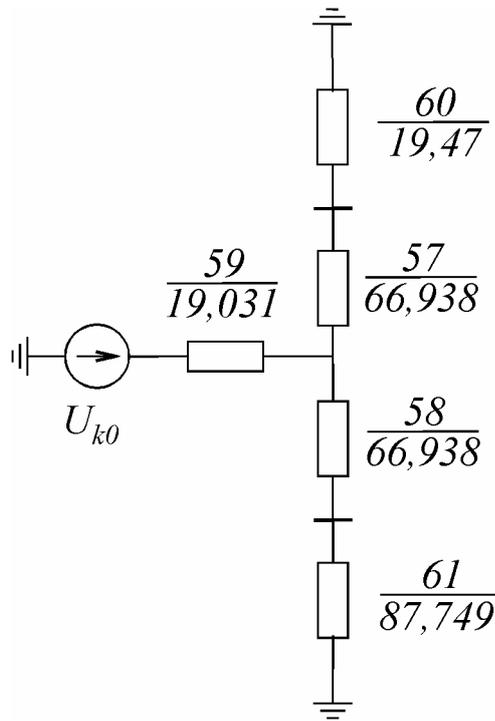


Рисунок 3.25

$$x_{62} = x_{60} + x_{57} ;$$

$$x_{62} = 19,47 + 66,938 = 86,408 \text{ Ом} ;$$

$$x_{63} = x_{62} + x_{58} ;$$

$$x_{63} = 87,749 + 66,938 = 154,684 \text{ Ом} ;$$

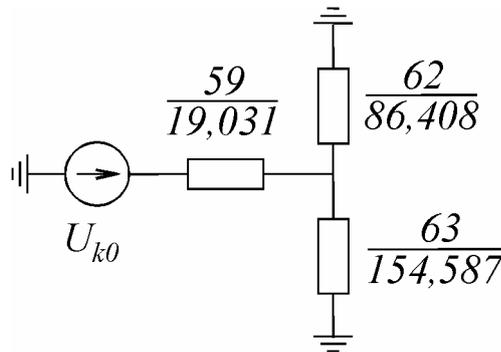


Рисунок 3.26

$$x_{64} = \frac{x_{61} \cdot x_{63}}{x_{61} + x_{63}} ;$$

$$x_{64} = \frac{86,408 \cdot 154,687}{86,408 + 154,687} = 55,44 \text{ Ом} ;$$

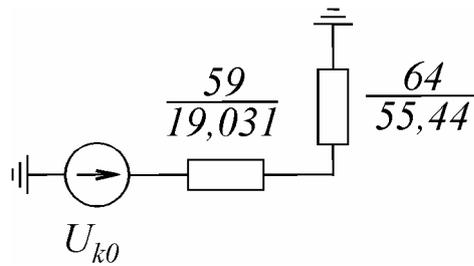


Рисунок 3.27

$$x_{0\Sigma} = x_{64} + x_{59} ;$$

$$x_{0\Sigma} = 55,44 + 19,031 = 74,471 \text{ Ом} ;$$

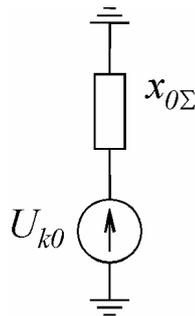


Рисунок 3.28

Для однофазного к.з. значение тока прямой последовательности определяется по формуле

$$I_{KA1}^{(1)} = \frac{E_{A1\Sigma}}{(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}$$

где $x_{\Delta}^{(n)}$ - дополнительное сопротивление, определяемое по таблице 2.1.

$$x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} ;$$

$$x_{\Delta}^{(1)} = 35,377 + 74,471 = 109,848 \text{ Ом.}$$

$$I_{KA1}^{(1)} = \frac{135,6}{(35,377 + 109,848)} = 0,93 \text{ кА.}$$

При однофазном к.з.

$$\dot{I}_{KA1} = \dot{I}_{KA2} = \dot{I}_{KA0} = 0,93 \text{ кА.}$$

Ток повреждённой фазы в месте к.з.

$$I_{KA1}^{(1)} = m^{(1)} \cdot I_{KA1}^{(1)} ;$$

где $m^{(1)}$ - коэффициент пропорциональности, определяемый по таблице 2.1.

$$I_{KA1}^{(1)} = 3 \cdot 0,93 = 2,79 \text{ кА} .$$

Напряжения прямой последовательности в месте к.з. (см. таблицу 2.1)

$$\dot{U}_{KA1}^{(1)} = j \cdot I_{KA1} \cdot x_{\Delta}^{(1)} ;$$

$$U_{KA1}^{(1)} = 0,93 \cdot 109,848 = 102,159 \text{ кВ} .$$

Напряжение обратной последовательности (там же)

$$\dot{U}_{KA2}^{(1)} = -I_{KA1} \cdot j \cdot x_{2\Sigma} ;$$

$$U_{KA2}^{(1)} = -0,93 \cdot 35,377 = -32,901 \text{ кВ} .$$

Напряжение нулевой последовательности (там же)

$$\dot{U}_{KA0}^{(1)} = -I_{KA1} \cdot j \cdot x_{0\Sigma} ;$$

$$U_{KA0}^{(1)} = -0,93 \cdot 74,471 = -69,258 \text{ кВ} .$$

Напряжение повреждённой фазы

$$\dot{U}_{KA} = \dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{KA0} ;$$

$$U_{KA}^{(1)} = 102,159 - 32,901 - 69,258 = 0 .$$

По результатам расчета построены векторные диаграммы токов и напряжений.

Векторная диаграмма токов представлена на рисунке 3.29.

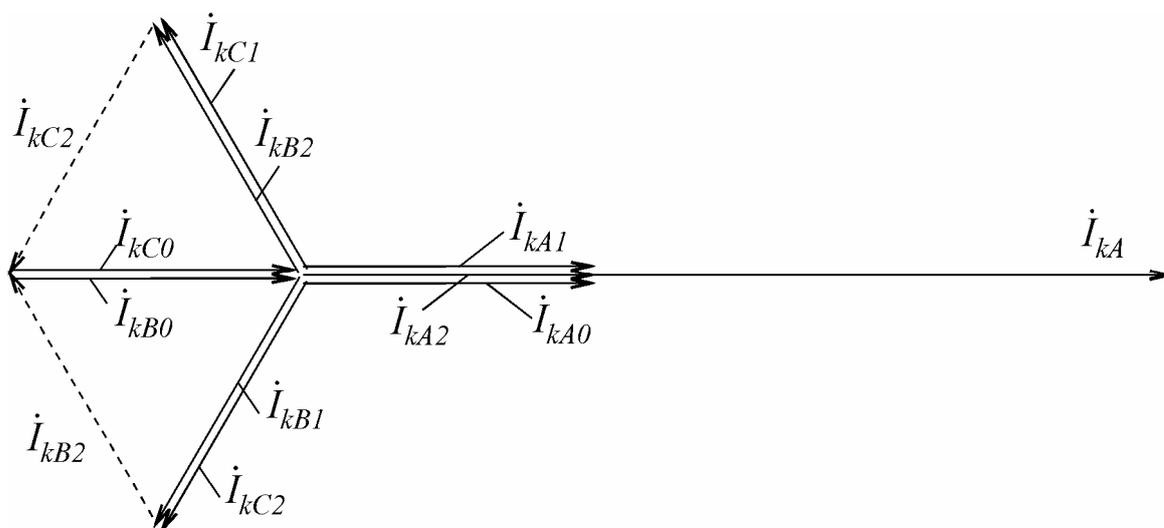
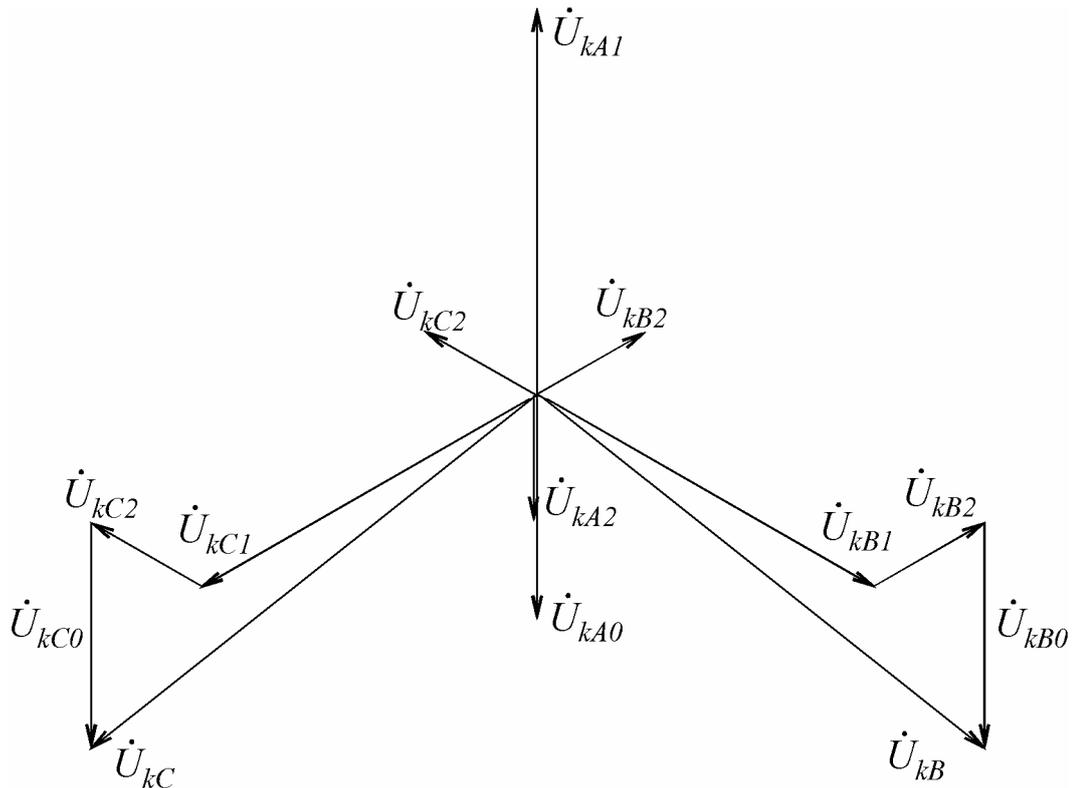


Рисунок 3.29

Из векторной диаграммы следует, что $\dot{I}_{kB} = \dot{I}_{kC} = 0$.

Векторная диаграмма напряжений представлена на рисунке 3.30.



$$U_{kA1} = 102,459 \text{ кВ};$$

$$U_{kA2} = -32,901 \text{ кВ};$$

$$U_{kA0} = -69,258 \text{ кВ};$$

Рисунок 3.30

Напряжения неповрежденных фаз в месте к.з. определяются по формулам:

$$\dot{U}_{kB} = a^2 \cdot \dot{U}_{kA1} + a \cdot \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{kA0};$$

$$\dot{U}_{kB} = a^2 \cdot \overset{\bullet(1)}{I_{KA1}} \cdot j \cdot (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) + a \cdot \overset{\bullet(1)}{I_{KA1}} \cdot j \cdot x_{2\Sigma} + \overset{\bullet(1)}{I_{KA1}} \cdot j \cdot x_{0\Sigma}$$

$$\begin{aligned} U_{kB} &= a^2 \cdot 0,93 \cdot j \cdot (35,377 + 74,471) + a \cdot 0,93 \cdot j \cdot 35,377 + 0,93 \cdot j \cdot 74,471 = \\ &= 156,326 \cdot e^{j221,63^\circ} \text{ кВ}; \end{aligned}$$

Аналогично определяется напряжение для фазы С

$$\dot{U}_{kC} = a \cdot \dot{U}_{kA1} + a^2 \cdot \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{kA0};$$

$$U_{kC} = (-\sqrt{3} \cdot 35,377 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 74,471 - j1,5 \cdot 74,471) \cdot 0,93 = 156,326 \cdot e^{j318,37^\circ} \text{ кВ}.$$

Эти же значения можно получить из векторной диаграммы (рисунок 3.29) с учетом принятого масштаба.

Список использованных источников

1 ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. Введ.. 2007-12-07. М.: Стандартинформ, 2007. 39 с.

2 ГОСТ 26522-85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1987

3 Переходные процессы в электроэнергетических системах: Учебник для вузов/ И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, М. В. Пираторов; под. ред. И. П. Крючкова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008

4 Короткие замыкания и выбор электрооборудования: Учебное пособие для вузов/ И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев и др.; под. ред. И. П. Крючкова, В.А. Старшинова. М.: Издательский дом МЭИ, 2012

5 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования/ под. ред. Б. М. Неклепаева. М.: Изд-во НЦ ЭМА 2002, - 152 с.

6 Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия. 1970, - 520 с.