

## Номера вариантов

1. Арженовсков Александр Владимирович
2. Ковалёв Игорь Сергеевич
3. Озимов Никита Владиславович
4. Ольховский Виталий Владимирович
5. Родоченко Родион Александрович
6. Севостьянов Данил Андреевич
7. Судаков Валерий Юрьевич
8. Сухинин Иван Николаевич
9. Тулаев Максим Александрович
10. Фисенко Максим Робертович
11. Черемисин Михаил Сергеевич
12. Шкредов Евгений Валерьевич

## Расчетные схемы

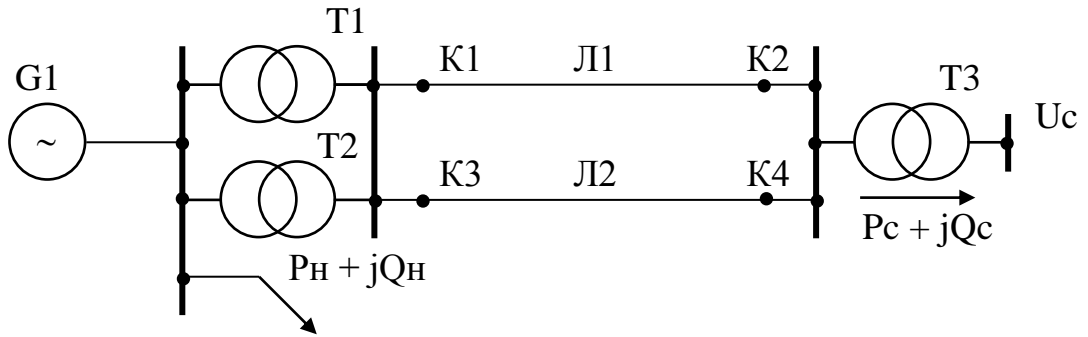


Рисунок П.1

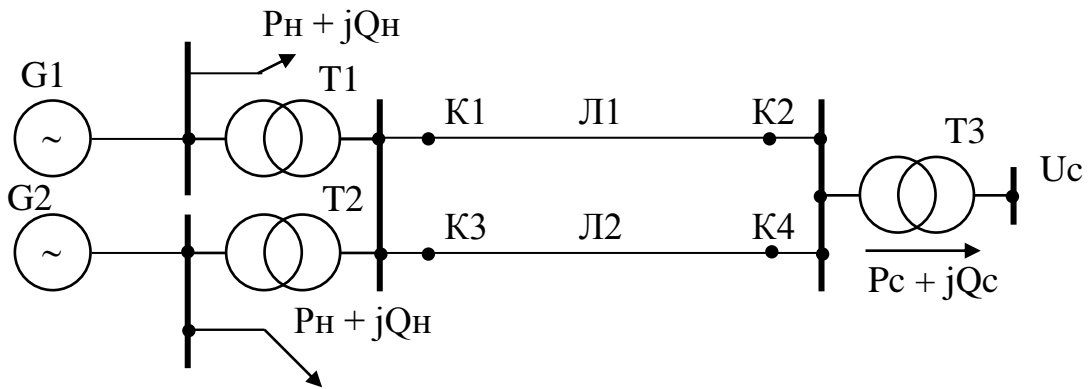


Рисунок П.2

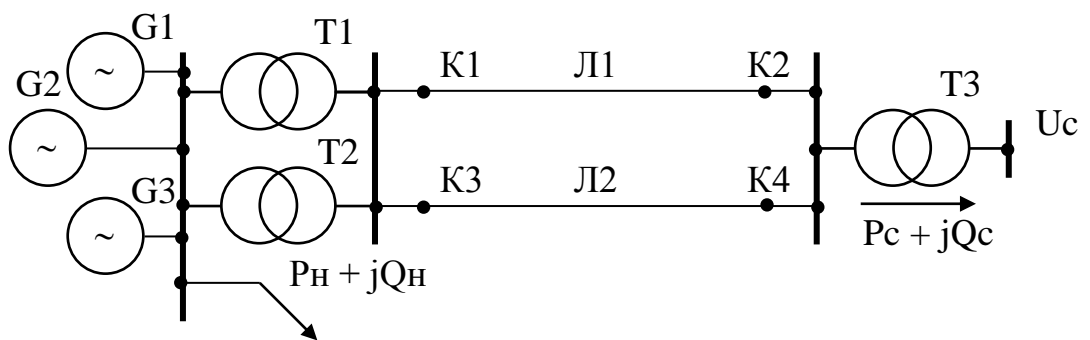


Рисунок П.3

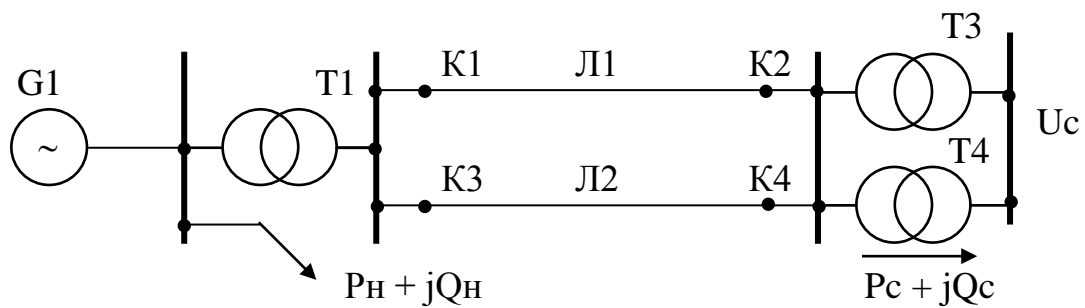


Рисунок П.4

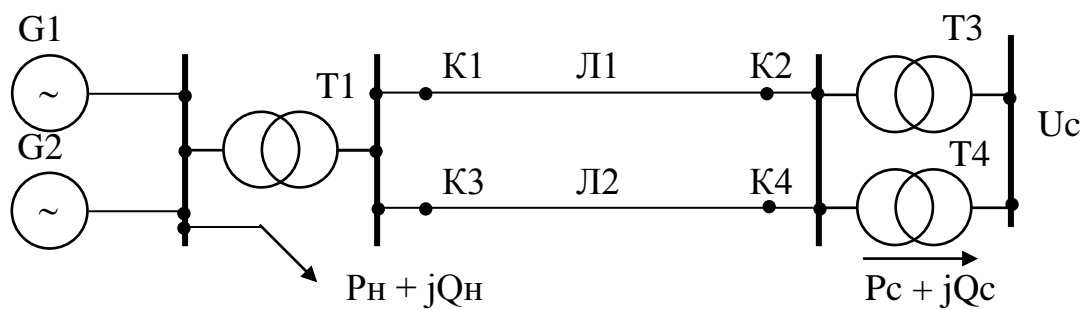


Рисунок П.5

Таблица вариантов

Вариант	Номер схемы	Генераторы						Трансформаторы $T_1 = T_2$			Трансформаторы $T_3 = T_4$			Длина ЛЭП $L$ , км	$P_c$ , МВт при $\cos \varphi_c = 0,9$	$P_H$ , МВт при $\cos \varphi_H = 0,85$	$U_c$ , кВ	Точка к.з.
		$S_H$ , МВА	$U_H$ , кВ	$\cos \varphi_H$	$X'_{*dH}$	$X_{*2}$	$T_J$ , с	$S_H$ , МВА	$U_K$ , %	$K$	$S_H$ , МВА	$U_K$ , %	$K$					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1	400	10,5	0,85	0,235	0,164	7,0	2×200	12	$\frac{10,5}{248}$	340	12	$\frac{220}{121}$	200	220	50	118	$K_1$
2	2	2×235	15,75	0,85	0,29	0,232	6,8	2×200	11	$\frac{15,75}{242}$	400	11	$\frac{230}{121}$	180	330	50	115	$K_2$
3	3	3×125	13,8	0,8	0,28	0,234	6,5	2×200	10,5	$\frac{13,8}{121}$	360	12	$\frac{115}{330}$	70	240	25	340	$K_3$
4	4	588	20	0,85	0,37	0,296	6,3	630	11,5	$\frac{20,24}{347}$	2×250	11	$\frac{330}{115}$	250	370	40	110	$K_4$
5	5	2×294	15,75	0,85	0,33	0,2	8,5	400	11,5	$\frac{15,75}{347}$	2×200	11	$\frac{330}{230}$	280	360	50	220	$K_1$
6	1	353	20	0,85	0,3	0,238	7,0	2×160	10,5	$\frac{20}{242}$	340	12	$\frac{240}{330}$	210	210	40	320	$K_2$
7	2	2×235	15,75	0,85	0,29	0,232	6,8	2×200	11	$\frac{15,75}{121}$	400	11	$\frac{115}{230}$	95	320	60	225	$K_3$
8	3	3×125	13,8	0,8	0,28	0,234	6,5	2×200	10,5	$\frac{13,8}{242}$	360	12	$\frac{230}{115}$	150	230	35	118	$K_4$
9	4	588	20	0,85	0,37	0,296	6,3	630	11,5	$\frac{20}{242}$	2×250	11	$\frac{230}{525}$	260	360	50	500	$K_1$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
10	5	2×294	15,75	0,85	0,33	0,2	8,5	400	13	$\frac{15,75}{525}$	2×200	11	$\frac{500}{230}$	320	370	40	220	K <sub>2</sub>
11	1	353	20	0,85	0,3	0,238	7,0	2×160	10,5	$\frac{20}{121}$	400	11,5	$\frac{121}{230}$	85	220	30	230	K <sub>3</sub>
12	2	2×235	15,75	0,85	0,29	0,232	6,8	2×200	11	$\frac{15,75}{242}$	400	11	$\frac{230}{121}$	180	330	50	115	K <sub>4</sub>
13	3	3×125	13,8	0,8	0,28	0,234	6,5	2×200	10,5	$\frac{13,8}{121}$	360	12	$\frac{115}{330}$	70	240	25	340	K <sub>1</sub>
14	4	588	20	0,85	0,37	0,296	6,3	630	11,5	$\frac{20,2}{347}$	2×250	11	$\frac{330}{115}$	250	370	40	110	K <sub>2</sub>
15	5	2×294	15,75	0,85	0,33	0,2	8,5	400	11,5	$\frac{15,75}{347}$	2×200	11	$\frac{330}{230}$	280	360	50	220	K <sub>3</sub>
16	1	353	20	0,85	0,3	0,238	7,0	2×160	10,5	$\frac{20}{242}$	340	12	$\frac{240}{330}$	150	210	40	320	K <sub>4</sub>
17	2	2×235	15,75	0,85	0,29	0,232	6,8	2×200	11	$\frac{15,75}{121}$	400	11	$\frac{115}{230}$	250	320	60	225	K <sub>1</sub>
18	3	3×125	13,8	0,8	0,28	0,234	6,5	2×200	10,5	$\frac{13,8}{242}$	360	12	$\frac{230}{115}$	110	230	35	118	K <sub>2</sub>
19	4	588	20	0,85	0,37	0,296	6,3	630	11,5	$\frac{20}{242}$	2×250	11	$\frac{230}{525}$	210	360	50	520	K <sub>3</sub>
20	5	2×294	15,75	0,85	0,33	0,2	8,5	400	13	$\frac{15,75}{525}$	2×200	11	$\frac{500}{230}$	250	370	40	215	K <sub>4</sub>
21	1	400	10,5	0,85	0,235	0,164	7,0	2×200	12	$\frac{10,5}{248}$	340	12	$\frac{220}{121}$	200	220	50	118	K <sub>1</sub>
22	2	2×235	15,75	0,85	0,29	0,232	6,8	2×200	11	$\frac{15,75}{242}$	400	11	$\frac{230}{121}$	60	330	50	120	K <sub>2</sub>

*Примечание.* Для линии Л1 и Л2 при  $U \geq 220$  кВ –  $X_{1y\partial} = 0,32$  Ом/км,  $R_{1y\partial} = 0,12$  Ом/км.  
Для линий Л1 и Л2 при  $U = 500$  кВ –  $X_{1y\partial} = 0,30$  Ом/км,  $R_{1y\partial} = 0,07$  Ом/км.  
В остальных случаях –  $X_{1y\partial} = 0,40$  Ом/км,  $R_{1y\partial} = 0,32$  Ом/км.

# 1 ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Для участка электрической сети необходимо выполнить следующее:

- 1) По заданной расчетной схеме составить схему замещения и определить сопротивления элементов сети в относительных единицах.
- 2) Рассчитать электродвижущую силу (ЭДС) генератора в сверхпереходном и переходном режимах.
- 3) Рассчитать начальный сверхпереходной ток трехфазного короткого замыкания в заданной точке сети.
- 4) Составить схемы замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.
- 5) Рассчитать токи несимметричных коротких замыканий: однофазного, двухфазного и двухфазного на землю и сравнить их.

## 2 СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Схема замещения представляет собой электрическую схему, соответствующую по исходным данным расчетной схеме, но в которой все трансформаторные связи заменены электрическими. При составлении схемы замещения пассивные элементы расчетной схемы (трансформаторы, линии электропередачи, реакторы и т.д.) заменяются сопротивлениями, а источники питания (генераторы, электрическая система) – ещё и ЭДС.

**Пример 1.** По заданной расчетной схеме (рисунок 1) составить схему замещения.

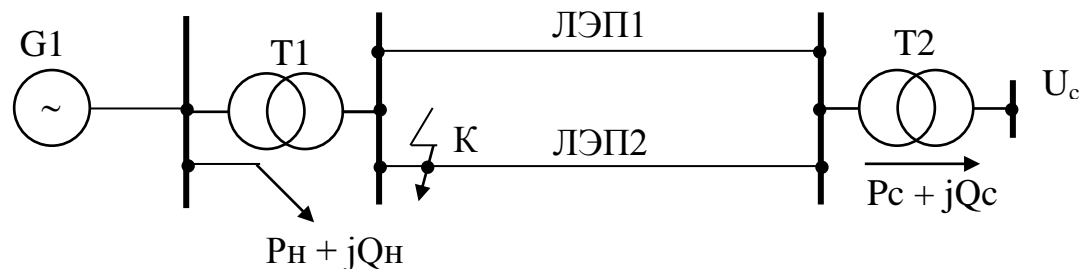


Рисунок 1 – Расчетная схема

В расчетную схему входят источники питания: генератор  $G1$  и питаемая электроэнергетическая система с напряжением на шинах  $U_c$ , а также статические элементы: трансформаторы  $T1$  и  $T2$ , двухцепная линия электропередачи  $ЛЭП1$  и  $ЛЭП2$ . Генераторная станция передает в электроэнергетическую систему мощность  $P_c + jQ_c$ . К генераторным шинам трансформатора  $T1$  подключена нагрузка мощностью  $R_n + jQ_n$ . Схема замещения заданной расчетной схемы при пренебрежении активными сопротивлениями элементов представлена на рисунке 2.

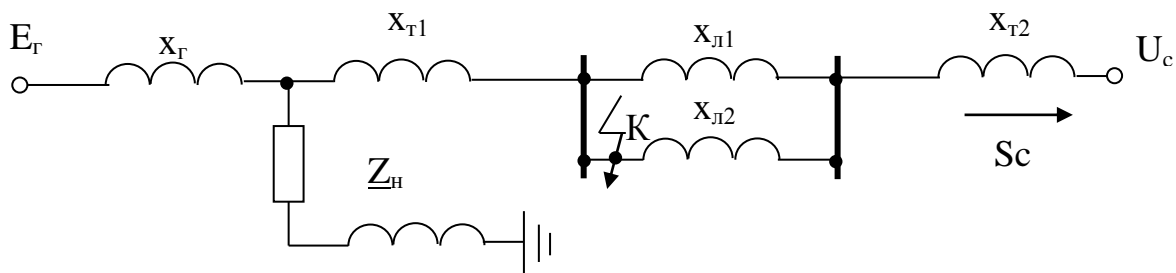


Рисунок 2 – Схема замещения

Необходимые исходные данные для элементов расчетной схемы выбираются в соответствии с заданным вариантом по таблице П.В. Сверхпереходное сопротивление генератора принять равным  $x''_d = 0,68 \cdot x'_d$ . Сопротивление системы считать равным нулю.

При расчетах электромагнитных или электромеханических переходных процессов сопротивления и ЭДС, входящие в схему замещения, выражаются в именованных или относительных единицах. Заданную электрическую систему можно считать сложной, поэтому расчеты рекомендуется выполнять в относительных единицах.

Под относительным значением физической величины понимают ее отношение к другой одноименной физической величине, выбранной за единицу измерения (базисной величине). Для перевода токов, напряжений, сопротивлений и мощностей в относительные единицы обычно произвольно принимают значения базисной мощности  $S_\delta$  и базисного напряжения  $U_\delta$ . Желательно выбирать такие их значения, чтобы расчеты получились более удобными.

Тогда, если значения токов, напряжений, сопротивлений и мощностей заданы в именованных единицах, то перевод их в относительные единицы осуществляется по следующим зависимостям

$$I_* = \frac{I}{I_\delta} = I \cdot \frac{\sqrt{3}U_\delta}{S_\delta}, \quad U_* = \frac{U}{U_\delta}, \quad Z_* = \frac{Z}{Z_\delta} = Z \cdot \frac{S_\delta}{U_\delta^2}, \quad S_* = \frac{S}{S_\delta}.$$

В случае, когда в схеме замещения имеется несколько ступеней трансформации, выбирается основная ступень трансформации, и все электрические величины приводятся к напряжению этой ступени. Обычно в качестве основной ступени трансформации принимают ту ступень, где произошло короткое замыкание.

При использовании метода относительных единиц вначале рассчитывают базисные напряжения ступеней трансформации, приведенные к основной

$$U_{\delta i} = \frac{U_{\delta 1}}{k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i},$$

где  $U_{\delta i}$  – базисное напряжение  $i$ -ой ступени трансформации;  
 $U_{\delta 1}$  – базисное напряжение основной ступени трансформации;  
 $k_1, k_2, \dots, k_i$  – коэффициенты трансформации последовательно включенных трансформаторов, определенные в направлении от



основной ступени к ступени, где производится пересчет величин.

Пересчет остальных величин ведут по формулам таблицы 1.

Электромеханическая постоянная генератора  $T_J$  в относительных единицах равна

$$T_{*J} = T_J \cdot \frac{S_H}{S_{\bar{\sigma}}}.$$

**Пример 2.** Определить сопротивления элементов схемы замещения (рисунок 2) в относительных единицах. Исходные данные для расчета: синхронный генератор ( $S_H = 400$  МВА,  $U_H = 10,5$  кВ,  $\cos\varphi_H = 0,85$ ,  $x'_{*dH} = 0,235$ ), трансформаторы Т1 ( $S_{H1} = 360$  МВА,  $u_{k1} = 12$  %,  $K_1 = 10,5/248$ ) и Т2 ( $S_{H2} = 360$  МВА,  $u_{k2} = 12$  %,  $K_2 = 220/121$ ), линия электропередачи ( $U_H = 220$  кВ,  $x_{lyd} = 0,32$  Ом/км,  $L = 100$  км), система ( $U_H = 110$  кВ).

Так как точка короткого замыкания находится вначале линии электропередачи напряжением  $220$  кВ, то в качестве базисного напряжения основной ступени трансформации принимаем  $U_{\bar{\sigma}1} = 220$  кВ. Базисное напряжение той ступени, где находится генератор равно

$$U_{\bar{\sigma}2} = U_{\bar{\sigma}1} \cdot \frac{10,5}{248} = 9,306 \text{ кВ}.$$

Следовательно, сверхпереходное сопротивление генератора в относительных единицах при  $S_{\bar{\sigma}} = 200$  МВА, будет равно

$$x''_{*d} = 0,68 \cdot x'_{*dH} \cdot \frac{U_H^2 \cdot S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}2}^2 \cdot S_H} = 0,68 \cdot 0,235 \cdot \frac{10,5^2 \cdot 200}{9,306^2 \cdot 400} = 0,1017.$$

Переходное сопротивление генератора при выбранных базисных условиях равно

$$x'_{*d} = x'_{*dH} \cdot \frac{U_H^2 \cdot S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}2}^2 \cdot S_H} = 0,235 \cdot \frac{10,5^2 \cdot 200}{9,306^2 \cdot 400} = 0,15.$$

Индуктивные сопротивления трансформаторов равны

$$x_{*T1} = \frac{u_{k1}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}1}^2} = \frac{12}{100} \cdot \frac{248^2}{360} \cdot \frac{200}{220^2} = 0,085,$$

$$x_{*T2} = \frac{u_{k2}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}1}^2} = \frac{12}{100} \cdot \frac{220^2}{360} \cdot \frac{200}{220^2} = 0,067.$$

При расчете сопротивлений трансформаторов удобно принимать номинальные напряжения ступеней ближайших к базисной ступени трансформации.

Индуктивное сопротивление линии электропередачи равно

$$x_{*л1} = x_{lyd} \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}1}^2} = 0,38 \cdot 100 \cdot \frac{200}{220^2} = 0,157.$$

Напряжение на шинах электроэнергетической системы в относительных единицах

$$U_{*c} = \frac{U_c}{U_{61}} \cdot \frac{220}{121} = 0,91.$$

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС ГЕНЕРАТОРА В ПЕРЕХОДНОМ И СВЕРХПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМАХ

При определении ЭДС генератора полагаем, что напряжение системы постоянно и активные сопротивления генератора, линий и трансформаторов пренебрежимо малы. Все электрические величины переведены в относительные единицы (индекс \*).

По известным сопротивлениям участка электрической сети, напряжению в конце участка и передаваемой мощности напряжение или ЭДС в начале сети можно определить как

$$E = \sqrt{\left( U + \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U} \right)^2 + \left( \frac{P \cdot x - Q \cdot r}{U} \right)^2},$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P \cdot x - Q \cdot r}{U^2 + P \cdot r + Q \cdot x},$$

где  $U$  – напряжение в конце участка электрической сети;

$P$  и  $Q$  – соответственно активная и реактивная передаваемые мощности;

$r$  и  $x$  – соответственно активное и реактивное сопротивления электрической сети;

$\delta$  – угол между напряжением в конце участка электрической сети и напряжением или ЭДС в начале.

В курсовой работе сначала с учетом принятых допущений определяется напряжение на шинах генератора

$$U_{*g} = \sqrt{\left( U_{*c} + \frac{Q_* \cdot x_{*\Sigma}}{U_{*c}} \right)^2 + \left( \frac{P_* \cdot x_{*\Sigma}}{U_{*c}} \right)^2},$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_* \cdot x_{*\Sigma}}{U_{*c}^2 + Q_* \cdot x_{*\Sigma}},$$

где  $x_{*\Sigma}$  – суммарное эквивалентное реактивное сопротивление электрической сети до генератора в относительных единицах.

**Пример 3.** Записать выражение для расчета суммарного эквивалентного реактивного сопротивления в относительных единицах при определении напряжения на шинах генератора (схема замещения электрической сети приведена на рисунке 2)

$$x_{*\Sigma} = x_{*T1} + \frac{x_{*L1}}{2} + x_{*T2}.$$

После определения напряжения на шинах генератора нужно рассчитать сопротивление нагрузки

$$Z_{*H} = \frac{U_{*2}^2}{S_{*H}},$$

$$r_{*H} = Z_{*H} \cdot \cos \varphi_H,$$

$$x_{*H} = \sqrt{Z_{*H}^2 - r_{*H}^2}.$$

Далее рассчитывается мощность, выдаваемая генератором в электрическую сеть. На основании баланса мощности на шинах генератора

$$\tilde{S}_{*2} = \tilde{S}_{*H} + \tilde{S}_{*c} + j\Delta Q_{*c} = P_{*2} + jQ_{*2},$$

где  $\tilde{S}_{*H}$  – полная комплексная мощность, потребляемая нагрузкой;

$\tilde{S}_{*c}$  – полная комплексная мощность, передаваемая в систему;

$\Delta Q_{*c}$  – потери реактивной мощности в сети, которые определяются как

$$\Delta Q_{*c} = I_{*2}^2 \cdot x_{*\Sigma} = \left( \frac{S_{*c}}{U_{*c}} \right)^2 \cdot x_{*\Sigma} = \frac{P_{*c}^2 + Q_{*c}^2}{U_{*c}^2} \cdot x_{*\Sigma}.$$

Определим ЭДС генератора в переходном и сверхпереходном режимах. В переходном режиме

$$E'_{*2} = \sqrt{\left( U_{*2} + \frac{Q_{*2} \cdot x'_{*d}}{U_{*2}} \right)^2 + \left( \frac{P_{*2} \cdot x'_{*d}}{U_{*2}} \right)^2},$$

$$\operatorname{tg}(\delta' - \delta) = \frac{P_{*2} \cdot x'_{*d}}{U_{*2}^2 + Q_{*2} \cdot x'_{*d}}.$$

В сверхпереходном режиме

$$E''_{*2} = \sqrt{\left( U_{*2} + \frac{Q_{*2} \cdot x''_{*d}}{U_{*2}} \right)^2 + \left( \frac{P_{*2} \cdot x''_{*d}}{U_{*2}} \right)^2},$$

$$\operatorname{tg}(\delta'' - \delta) = \frac{P_{*2} \cdot x''_{*d}}{U_{*2}^2 + Q_{*2} \cdot x''_{*d}}.$$

#### 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО СВЕРХПЕРЕХОДНОГО ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Для проверки оборудования по электродинамической и термической стойкости необходимо рассчитать периодическую составляющую максимального тока короткого замыкания. В большинстве практических случаев максимальное значение имеет ток трехфазного короткого замыкания.

Периодическую составляющую тока трехфазного короткого замыкания в начальный момент времени или начальный сверхпереходной ток короткого замыкания от каждого источника питания рассчитывают по закону Ома. Для этого предварительно схему замещения упрощают.

**Пример 4.** Упростить схему замещения (рисунок 2) и составить выражения для расчета начального сверхпереходного тока трехфазного короткого замыкания.

В данной схеме замещения имеется два источника питания. Поэтому преобразованная схема замещения будет иметь вид

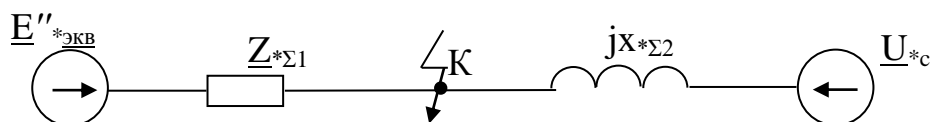


Рисунок 3 – Упрощенная схема замещения

Здесь

$$\underline{E}''_{*\text{ЭКВ}} = \frac{\underline{E}''_{*2} \cdot \underline{Z}_{*H}}{\underline{Z}_{*H} + jx''_{*d}},$$

$$\underline{Z}_{*\Sigma 1} = \frac{\underline{Z}_{*H} \cdot jx''_{*d}}{\underline{Z}_{*H} + jx''_{*d}} + jx_{*T1},$$

$$jx_{*\Sigma 2} = \frac{jx_{*Л1}}{2} + jx_{*T2}.$$

Следует обратить внимание на то, что в полученных выражениях используются сверхпереходные ЭДС и сопротивление генератора.

Периодическая составляющая тока трехфазного короткого замыкания в генераторной ветви определяется как

$$\underline{I}''_{*\text{КГ}} = \frac{\underline{E}''_{*\text{ЭКВ}}}{\underline{Z}_{*\Sigma 1}}.$$

Периодическая составляющая тока трехфазного короткого замыкания в ветви от электрической системы определяется как

$$\underline{I}''_{*\text{КС}} = \frac{\underline{U}_{*c}}{jx_{*\Sigma 2}}.$$

Суммарный ток трехфазного короткого замыкания в точке К

$$\underline{I}''_{*К} = \underline{I}''_{*\text{КГ}} + \underline{I}''_{*\text{КС}}.$$

В именованных единицах

$$\underline{I}''_{*К} = \underline{I}''_{*К} \cdot I_{\bar{\sigma}} = \underline{I}''_{*К} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{\sigma}}}.$$

## 5 СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ТОКОВ ПРЯМОЙ, ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Кроме трехфазного короткого замыкания в электрической сети могут возникать двухфазные, двухфазные на землю и однофазные короткие замы-

кания. При этих режимах симметрия токов и напряжений нарушается, что приводит к превышению токов в некоторых фазах сверх номинальных значений. Расчет и анализ этих процессов имеет практический интерес, так как данные несимметричные режимы нарушают нормальную работу электрической системы и приводят к выходу из строя электрооборудования.

Для упрощения расчетов несимметричных режимов используется метод симметричных составляющих. В этом методе несимметричную систему напряжений и токов представляют в виде трех симметричных систем: прямой, обратной и нулевой последовательностей. Схемы замещения для токов каждой последовательности составляются отдельно или для каждого несимметричного режима составляется комплексная схема замещения.

Схема замещения для токов прямой последовательности не отличается от схемы замещения, составленной при вычислении токов трехфазного короткого замыкания.

Схема замещения для токов обратной последовательности состоит из тех же элементов, что и схема прямой последовательности. ЭДС обратной последовательности источников питания отсутствует. Началом схемы является точка, объединяющая начала генераторных ветвей, а концом схемы – точка короткого замыкания, в которой приложено напряжение обратной последовательности.

Схема замещения для токов нулевой последовательности отличается от схем прямой и обратной последовательностей. Приступая к составлению этой схемы замещения, выявляют контуры в цепи, электрически связанные с местом короткого замыкания через заземленные нейтрали. Схему нулевой последовательности начинают составлять от точки короткого замыкания, объединяя в общую точку концы элементов схемы, через которые возвращаются токи нулевой последовательности.

Эквивалентные сопротивления отдельных последовательностей определяют путем сворачивания схемы замещения относительно точки короткого замыкания. Для всех вариантов сопротивление воздушной линии токам нулевой последовательности принять  $x_0 = 3x_1$ , где  $x_1$  – индуктивное сопротивление прямой последовательности. Учтеть, что нейтральные точки трансформаторов заземлены и  $x_{*T(0)} = x_{*T}$ .

**Пример 5.** Для схемы замещения (рисунок 2) составить схемы для токов прямой, обратной и нулевой последовательности и записать выражения для расчета их основных параметров.

1) При составлении схемы замещения для токов прямой последовательности воспользуемся упрощенной схемой замещения (рисунок 3), к которой добавим источник напряжения прямой последовательности

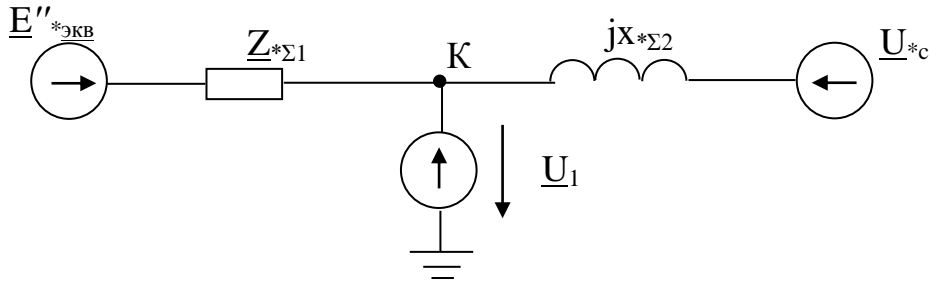
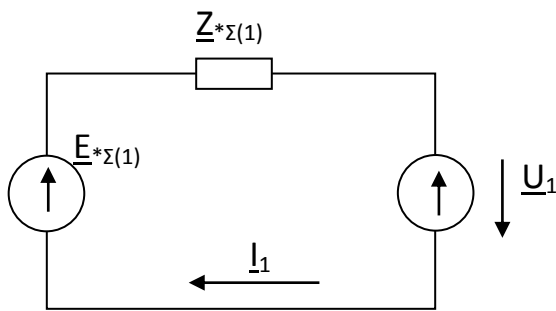


Рисунок 4 – Схема замещения для токов прямой последовательности

Сворачивая схему относительно точки короткого замыкания, получим эквивалентную схему замещения для токов прямой последовательности



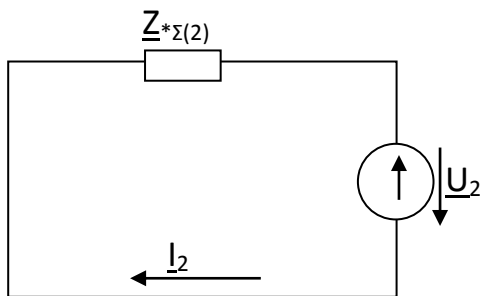
Здесь

$$E_{*\Sigma(1)} = \frac{E''_{*\text{ЭКВ}} \cdot jx_{*\Sigma 2} + U_{*c} \cdot Z_{*\Sigma 1}}{Z_{*\Sigma 1} + jx_{*\Sigma 2}},$$

$$Z_{*\Sigma(1)} = \frac{Z_{*\Sigma 1} \cdot jx_{*\Sigma 2}}{Z_{*\Sigma 1} + jx_{*\Sigma 2}}.$$

Рисунок 5 – Эквивалентная схема для токов прямой

2) Схема замещения для токов обратной последовательности будет аналогична предыдущей схеме, только в точке короткого замыкания будет включен источник напряжения обратной последовательности.



Расчет эквивалентного сопротивления обратной последовательности выполняется с учетом того, что сопротивление генератора изменится на  $x''_{*d} \rightarrow x_{*2}$ , а сопротивление нагрузки – на  $Z_{*н(2)} = 0,35Z_{*н}$ .

Рисунок 6 – Эквивалентная схема для токов обратной

$$E_{*\Sigma(2)} = 0,$$

$$Z_{*\Sigma(2)} = \frac{Z_{*\Sigma 1} \cdot jx_{*\Sigma 2}}{Z_{*\Sigma 1} + jx_{*\Sigma 2}},$$

где

$$Z_{*\Sigma 1} = \frac{0,35 \cdot Z_{*н} \cdot jx_{*2}}{0,35 \cdot Z_{*н} + jx_{*2}} + jx_{*T1},$$

$$jx_{*\Sigma 2} = \frac{jx_{*л1}}{2} + jx_{*T2}.$$

3) Схема замещения для токов нулевой последовательности будет иметь другой вид. Так как нейтралы трансформаторов заземлены, получим

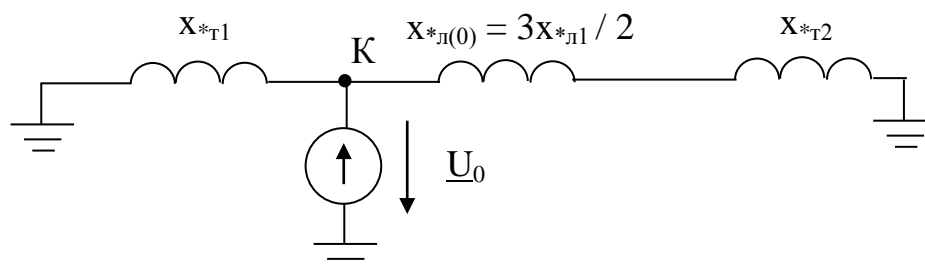


Рисунок 7 – Схема замещения для токов нулевой последовательности

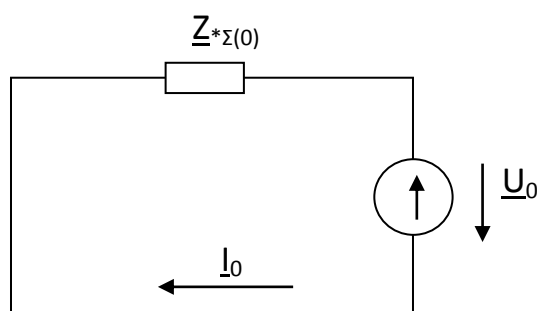


Рисунок 8 – Эквивалентная схема для токов нулевой последовательности

Эквивалентная схема замещения для токов нулевой последовательности приведена на рисунке 8.

Здесь

$$\underline{Z}_{*\Sigma(0)} = \frac{jx_{*T1} \cdot (3jx_{*л1} / 2 + jx_{*T2})}{jx_{*T1} + 3jx_{*л1} / 2 + jx_{*T2}} .$$

## 6 РАСЧЕТ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Из составленных эквивалентных схем замещения (рисунки 5,6 и 8) можно составить систему уравнений, решение которой совместно с граничными условиями позволяет определить токи и напряжения в любой из фаз при каждом из видов несимметричных коротких замыканий.

Основная система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{*\Sigma(1)} + \underline{U}_1 = \underline{E}_{*\Sigma(1)}; \\ \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{*\Sigma(2)} + \underline{U}_2 = 0; \\ \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{*\Sigma(0)} + \underline{U}_0 = 0. \end{cases}$$

*Расчет токов однофазного короткого замыкания.*

Граничными условиями при замыкании фазы А будут являться: равенство нулю токов в фазах В и С, а также напряжения в месте короткого замыкания

$$\underline{I}_{\kappa B} = 0, \quad \underline{I}_{\kappa C} = 0 \quad \text{и} \quad \underline{U}_{\kappa A} = 0.$$

Тогда, раскладывая напряжения и токи на симметричные составляющие и используя граничные условия, решение основной системы уравнений для тока в поврежденной фазе будет иметь вид

$$\underline{I}_{*\kappa}^{(1)} = \frac{3\underline{E}_{*\Sigma(1)}}{\underline{Z}_{*\Sigma(1)} + \underline{Z}_{*\Sigma(2)} + \underline{Z}_{*\Sigma(0)}}.$$

*Расчет токов двухфазного короткого замыкания.*

Граничными условиями при замыкании фаз В и С будут являться: равенство нулю тока в фазе А, равенство напряжений фаз В и С в месте короткого замыкания, а также равенство нулю суммы токов в фазах В и С

$$\underline{I}_{\kappa A} = 0, \quad \underline{I}_{\kappa B} = -\underline{I}_{\kappa C} \quad \text{и} \quad \underline{U}_{\kappa B} = \underline{U}_{\kappa C}.$$

Тогда токи в поврежденных фазах будут равны

$$\underline{I}_{*\kappa B}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}\underline{E}_{*\Sigma(1)}}{\underline{Z}_{*\Sigma(1)} + \underline{Z}_{*\Sigma(2)}} \cdot e^{-j90^\circ},$$

$$\underline{I}_{*\kappa C}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}\underline{E}_{*\Sigma(1)}}{\underline{Z}_{*\Sigma(1)} + \underline{Z}_{*\Sigma(2)}} \cdot e^{j90^\circ}.$$

*Расчет токов двухфазного короткого замыкания на землю.*

Граничными условиями при замыкании фаз В и С между собой и на землю будут являться: равенство нулю тока в фазе А, а также равенство нулю напряжений фаз В и С в месте короткого замыкания

$$\underline{U}_{\kappa B} = 0, \quad \underline{U}_{\kappa C} = 0 \quad \text{и} \quad \underline{I}_{\kappa A} = 0.$$

Тогда ток прямой последовательности рассчитывается как

$$\underline{I}_{*\kappa A}^{(1,1)} = \frac{\underline{E}_{*\Sigma(1)}}{\underline{Z}_{*\Sigma(1)} + \frac{\underline{Z}_{*\Sigma(2)} \cdot \underline{Z}_{*\Sigma(0)}}{\underline{Z}_{*\Sigma(2)} + \underline{Z}_{*\Sigma(0)}}}.$$

Соответственно токи в поврежденных фазах равны

$$\underline{I}_{*\kappa B}^{(1,1)} = \underline{I}_{*\kappa A}^{(1,1)} \cdot \left( a^2 - \frac{\underline{Z}_{*\Sigma(2)} + a \cdot \underline{Z}_{*\Sigma(0)}}{\underline{Z}_{*\Sigma(2)} + \underline{Z}_{*\Sigma(0)}} \right),$$

$$\underline{I}_{*\kappa C}^{(1,1)} = \underline{I}_{*\kappa A}^{(1,1)} \cdot \left( a - \frac{\underline{Z}_{*\Sigma(2)} + a^2 \cdot \underline{Z}_{*\Sigma(0)}}{\underline{Z}_{*\Sigma(2)} + \underline{Z}_{*\Sigma(0)}} \right),$$

где  $a = e^{j120^\circ}$  – фазовый множитель.