

3751



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра «Электрические станции»

## **СБОРНИК ЗАДАЧ**

по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах»

Минск  
БНТУ  
2010

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Электрические станции»

СБОРНИК ЗАДАЧ

по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы»  
и «Переходные процессы в электроэнергетических системах»

для студентов специальностей

1-43 01 01 «Электрические станции»,

1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,

1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-53 01 04 «Автоматизация  
и управление энергетическими процессами»  
специализации 1-53 01 04 03 «Автоматизация  
и релейная защита электроустановок»

Минск  
БНТУ  
2010

УДК 6213.018.782.3(0\076)

ББК 31.2.07

С 23

Составители:

*С.М. Силюк, В.А. Булат, Е.В. Булойчик*

Рецензенты:

*В.Б. Козловская, В.Г. Прокопенко*

С 23 Сборник задач по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-53 01 04 «Автоматизация и управление энергетическими процессами» специализации 1-53 01 04 03 «Автоматизация и релейная защита электроустановок» / сост.: С.М. Силюк, В.А. Булат, Е.В. Булойчик. – Минск: БНТУ, 2010. – 72 с.

Настоящий сборник рекомендуется к использованию на практических занятиях по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах».

В сборник включены наиболее типичные задачи по вопросам теории и практики расчета токов коротких замыканий в сложных электроэнергетических системах.

Сборник охватывает основные разделы теории электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах.

## Оглавление

Введение .....	4
1. Составление схем замещения и их преобразование .....	4
1.1. Параметры элементов электрических систем .....	4
1.2. Переход от магнитных связей к эквивалентным электрическим .....	9
1.3. Преобразование схем замещения .....	16
2. Расчет начального и установившегося токов короткого замыкания .....	18
3. Практические методы расчета симметричных КЗ .....	33
3.1. Порядок расчета периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых по общему изменению тока .....	33
3.2. Порядок расчета периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых по индивидуальному изменению тока .....	40
3.3. Порядок расчета токов КЗ методом типовых кривых .....	46
4. Расчет переходного процесса при однократной поперечной несимметрии .....	52
4.1. Определение токов несимметричных КЗ для различных моментов времени по типовым кривым .....	54
Литература .....	71

## Введение

Правильно организованные упражнения по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах» повышают понимание студентами вопросов теории и расчета, а также качество проработки теоретического и расчетного материала и их усвоение.

Весь материал сборника задач соответствует программе дисциплин для специальностей 1-43 01 01, 1-43 01 02, 1-43 01 03, 1-53 01 04 и состоит из 5 глав, содержащих задачи с достаточно подробными решениями и задачи без решений и ответов.

Основная литература, приведенная в конце сборника, может служить источником сведений, необходимых при решении задач.

### 1. Составление схем замещения и их преобразование

#### 1.1. Параметры элементов электрических систем

Параметры элементов электрических систем могут быть заданы в именованных числах, процентах или относительными величинами. Относительной величиной считают отношение данной величины к одноименной, принятой за основную (базисную); процентной – отношение данной величины в процентах к одноименной основной:

$$A_{*б} = \frac{A}{A_б} \quad (1)$$

$$A_{б\%} = \frac{A}{A_б} \cdot 100\% \quad (2)$$

Обозначаются эти величины: относительная – звездочкой, которая ставится внизу с правой стороны символа; процентная – знаком %.

Расчетными величинами для вычисления токов КЗ являются: напряжение (ЭДС), мощность, активное, реактивное и полное сопротивление элементов системы.

Если за базисные единицы принять произвольные значения полной мощности и линейного напряжения, то базисный ток и базисные сопротивления будут определены как:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} \quad (3)$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} \quad (4)$$

Относительные значения параметров при принятых базисных условиях будут определяться:

$$E_{*6} = \frac{E}{U_6} \quad (5)$$

$$U_{*6} = \frac{U}{U_6} \quad (6)$$

$$I_{*6} = \frac{I}{I_6} \quad (7)$$

$$S_{*6} = \frac{S}{S_6} \quad (8)$$

$$Z_{*6} = \frac{Z}{Z_6} = Z \cdot \frac{\sqrt{3}I_6}{U_6} = Z \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \quad (9)$$

Если параметры элементов расчетной схемы заданы в относительных единицах, приведенных к номинальным условиям, т. е. к номинальной мощности, номинальному напряжению и номинальному току, а их нужно выразить в долях от базисной величины, то необходимо сделать следующий пересчет:

$$E_{*6} = E_{*н} \cdot \frac{U_н}{U_6} \quad (10)$$

$$Z_{*6} = Z_{*н} \cdot \frac{I_6}{I_н} \cdot \frac{U_н}{U_6} = Z_{*н} \cdot \frac{S_6}{S_н} \cdot \frac{U_н^2}{U_6^2} \quad (11)$$

$$U_{*6} = U_{*н} \cdot \frac{U_н}{U_6} \quad (12)$$

$$I_{*6} = I_{*H} \cdot \frac{I_H}{I_6} \quad (13)$$

За базисную мощность целесообразно принимать число, кратное 10 МВА (100 МВА, 1000 МВА и т.д.), а иногда – часто повторяющиеся в исходной схеме номинальную мощность (или кратную ей). За базисное напряжение рекомендуется принимать номинальное напряжение одного из элементов схемы  $U_H$ .

Зная значения величин в относительных единицах, легко найти их значения в именованных единицах.

$$U = U_{*6} \cdot U_6 \quad (14)$$

$$I = I_{*6} \cdot I_6 \quad (15)$$

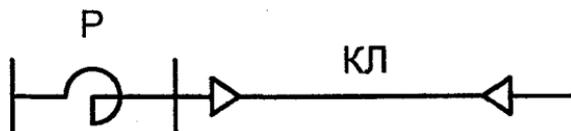
$$Z = Z_{*6} \cdot Z_6 = Z_{*6} \cdot \frac{U_6^2}{S_6} \quad (16)$$

$$U = U_{*H} \cdot U_H \quad (17)$$

$$I = I_{*H} \cdot I_H \quad (18)$$

$$Z = Z_{*H} \cdot Z_H = Z_{*H} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \quad (19)$$

Задача 1.1. Электрическая цепь состоит из последовательно соединенных реактора и кабельной линии длиной 2 км.



Р:  $x_P = 0,45$  Ом,  $I_H = 1000$  А,  $U_H = 10$  кВ;

КЛ:  $l = 2$  км,  $x_0 = 0,08$  Ом/км.

Определить индуктивное сопротивление элементов цепи в относительных единицах при номинальных условиях реактора.

Решение:

Принимаем  $U_6 = U_H = 10$  кВ;  $I_6 = I_H = 1$  кА, тогда

$$x_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3}I_6} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 1} = 5,7735 \text{ Ом.}$$

Сопротивление реактора в относительных единицах при принятых условиях:

$$x_{*1} = x_{*P6} = \frac{x_P}{x_6} = \frac{0,45}{5,7735} = 0,07794,$$

Кабельной линии:

$$x_{*2} = x_{*кЛ6} = \frac{x_{кЛ}}{x_6} = \frac{x_0 \cdot l}{x_6} = \frac{0,08 \cdot 2}{5,7735} = 0,0277.$$

Задача 1.2. Мощность генератора  $P_H = 25$  МВт;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $U_H = 10,5$  кВ,  $x_* = 0,2$  (отнесено к номинальным условиям). Найти сопротивление генератора в Омах.

Решение:

$$x_T = x_* \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{10,5^2 \cdot 0,8}{25} = 0,71 \text{ Ом.}$$

Задача 1.3. Реактивное сопротивление воздушной линии равно 0,4 Ом/км, длина линии  $l=160$  км, напряжение 115 кВ. Определить сопротивление линии в относительных единицах, приведенное к мощности  $S=200$  МВА.

Решение:

$$x_* = x \cdot \frac{S}{U_H^2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S}{U_H^2} = 0,4 \cdot 160 \cdot \frac{200}{115^2} = 0,97.$$

Задача 1.4. Мощность силового трансформатора  $S_H = 5,6$  МВА,  $U_k\% = 7,5$  %. Потери активной мощности при номинальном режиме  $\Delta P_H = 75,5$  кВт. Коэффициент трансформации  $n_T=38/6,3$ . Найти реактивное сопротивление трансформатора в Омах, приведенное к напряжению 38 и 6,3 кВ соответственно.

Решение:

Полное сопротивление трансформатора в относительных единицах при номинальных условиях равно:

$$z_* = U_{k*} = 0,075$$

Значение активного сопротивления в относительных единицах будет:

$$r_* = \frac{r}{r_H},$$

где

$$r = \frac{\Delta P_H}{3 \cdot I_H^2}, \quad \text{а} \quad r_H = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}.$$

Тогда:

$$r_* = \frac{\Delta P_H}{S_H} = \frac{75,5 \cdot 10^{-3}}{5,6} = 0,0135,$$

$$x_* = \sqrt{z_*^2 - r_*^2} = \sqrt{0,075^2 - 0,0135^2} = 0,074.$$

Это же сопротивление, приведенное к  $U=38$  кВ в Омах будет равно:

$$x = x_* \cdot \frac{U^2}{S_H} = 0,074 \cdot \frac{38^2}{5,6} = 19,08 \text{ Ом},$$

приведенное к  $U=6,3$  кВ:

$$x = 0,074 \cdot \frac{6,3^2}{5,6} = 0,525 \text{ Ом}.$$

Результаты подсчета показывают, что если пренебречь активным сопротивлением трансформатора при определении тока КЗ, то погрешность будет незначительной.

Задача 1.5. Определить, в каком соотношении находятся выраженные в Омах индуктивные сопротивления генераторов G1 и G2 одинаковой мощности, но с номинальными напряжениями соответственно 6,3 и 10,5 кВ, если их относительные индуктивные сопротивления при своих номинальных условиях одинаковы.

Решение:

$$S_1 = S_2 = S_H; \quad x_{*1} = x_{*2} = x_*.$$

Определяем индуктивные сопротивления генераторов G1 и G2, выраженные в Омах:

$$x_1 = x_* \cdot \frac{U_{H1}^2}{S_H};$$
$$x_2 = x_* \cdot \frac{U_{H2}^2}{S_H}.$$

Соотношение этих сопротивлений будет:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{U_{н1}^2}{U_{н2}^2} = \frac{6,3^2}{10,5^2} = 0,36.$$

Задача 1.6. Емкостная проводимость кабельной линии равна  $b_0 = 0,1 \cdot 10^{-3}$  1/Ом·км, индуктивное сопротивление кабеля 0,08 Ом/км. Длина линии  $l = 3$  км.

Найти емкостную проводимость и индуктивное сопротивление линии в относительных единицах при  $S = 10$  МВА и напряжении 6 кВ.

Решение:

$$x_* = x_0 \cdot l \cdot \frac{S}{U^2} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{10}{6^2} = 0,0665,$$
$$b_* = b \cdot \frac{U^2}{S} = b_0 \cdot l \cdot \frac{U^2}{S} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot \frac{6^2}{10} = 0,00108.$$

При расчете токов КЗ емкостную проводимость можно не учитывать, т.к. она во много раз меньше индуктивной.

### 1.2. Переход от магнитных связей к эквивалентным электрическим

Современные электроэнергетические системы включают в себя большое количество электрических станций, трансформаторных подстанций, линий электропередач различного напряжения. Для расчетов токов КЗ по исходной схеме электрической цепи составляют ее схему замещения. При составлении схемы замещения необходимо магнитные (трансформаторные) связи заменить эквивалентными электрическими путем приведения параметров всех элементов различных ступеней напряжения к одной ступени, принятой за основную или базисную.

Если между ступенью напряжения, на которой находятся элементы с подлежащими приведению ЭДС (напряжениями), токами, сопротивлениями и ступенью, принятой за основную (базисную), имеется  $m$  трансформаторов, то искомые значения этих величин, приведенные к основной (базисной) ступени напряжения, вычисляют как:

$$\dot{E} = E \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m; \quad (20)$$

$$\dot{U} = U \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m; \quad (21)$$

$$\dot{i} = \frac{I}{n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m}; \quad (22)$$

$$\dot{z} = z \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m. \quad (23)$$

Где  $E$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $z$  – истинные значения величин;  $n_1, n_2, \dots, n_m$  – фактические коэффициенты трансформации, точка над буквой указывает на то, что данная величина является приведенной.

В тех случаях, когда фактические (точные) коэффициенты трансформации трансформаторов и автотрансформаторов отсутствуют, приведение ЭДС и параметров элементов исходной схемы к одной ступени напряжения выполняют по средним коэффициентам трансформации, т.е. принимая коэффициент трансформации каждого трансформатора и автотрансформатора равным отношению так называемых средних номинальных напряжений сетей, связанных этим трансформатором или автотрансформатором.

Для каждой ступени напряжения устанавливают одно среднее номинальное напряжение, выбирая из принятого в нашей стране ряда средних номинальных напряжений: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 230; 340; 515; 770 кВ.

При замене фактических коэффициентов трансформации средними (приближенное приведение) произведение средних коэффициентов трансформации каскадно (последовательно) включенных трансформаторов оказывается равным отношению средних номинальных напряжений основной (базисной) ступени напряжения и ступени напряжения, с которой проводится пересчет, т.е. если за базисную ступень принять ступень с напряжением  $U_{срм}$ , а приведение осуществляется со ступени  $U_{ср1}$ , то:

$$n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m = \frac{U_{ср2}}{U_{ср1}} \cdot \frac{U_{ср3}}{U_{ср2}} \cdot \dots \cdot \frac{U_{срm}}{U_{срm-1}} = \frac{U_{срm}}{U_{ср1}} = \frac{U_6}{U_{ср1}} \quad (24)$$

Если за базисную ступень принять ступень с напряжением  $U_{ср1}$ , а приведение осуществляется со ступени с напряжением  $U_{срm}$ , то

$$n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_m = \frac{U_{ср1}}{U_{ср2}} \cdot \frac{U_{ср2}}{U_{ср3}} \cdot \dots \cdot \frac{U_{срm-1}}{U_{срm}} = \frac{U_{ср1}}{U_{срm}} = \frac{U_6}{U_{срm}}. \quad (25)$$

Таким образом, при составлении схемы замещения с приближенным приведением ЭДС и сопротивлений различных элементов исходной расчетной схемы к одной ступени напряжения и определении этих ЭДС и сопротивлений в именованных единицах расчетные формулы (20) ÷ (23) существенно упрощаются.

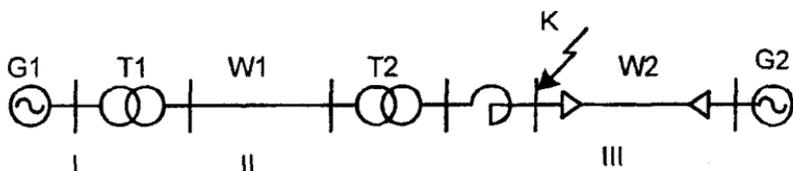
При приближенном приведении ЭДС и параметров различных элементов расчетной схемы к одной ступени напряжения и выражении их в относительных единицах (ЭДС, сопротивления), формулы (9) ÷ (11) примут следующий вид:

$$z_{*6} = z \cdot \frac{S_6}{U_{срн}^2} \quad (9a)$$

$$E_{*6} = E_{*н} \quad (10a)$$

$$z_{*6} = z_{*н} \cdot \frac{S_6}{S_n} \quad (11a)$$

Задача 1.7. Составить схему замещения для расчетной схемы, приведенной ниже, выразив параметры ее элементов в именованных и относительных единицах. Сделать точное и приближенное приведение параметров.



Исходные данные:

Генератор G1:  $P_n = 63$  МВт;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $U_n = 10,5$  кВ;

$x_d'' = 0,17$ ;  $E_1'' = 11$  кВ.

Генератор G2:  $P_n = 25$  МВт;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $U_n = 6,3$  кВ;

$x_d'' = 0,15$ ;  $E_1'' = 6,6$  кВ.

Трансформатор T1:  $S_n = 80$  МВА,  $U_k = 10,5\%$ ,  $n_1 = 121/10,5$ .

Трансформатор T2:  $S_n = 40$  МВА,  $U_k = 10,5\%$ ,  $n_1 = 115/6,3$ .

Воздушная ЛЭП W1:  $l = 70$  км,  $x_0 = 0,4$  Ом/км.

Кабельная ЛЭП W2:  $l = 4$  км,  $x_0 = 0,08$  Ом/км.

Реактор LR типа РБ-10-1000-0.45.

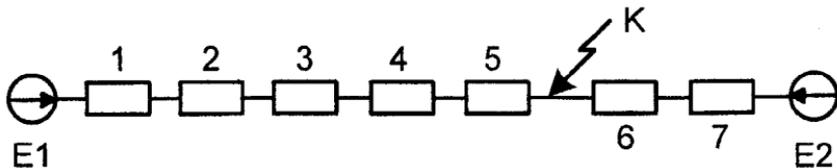


Рис. 1.1 – Схема замещения

Решение:

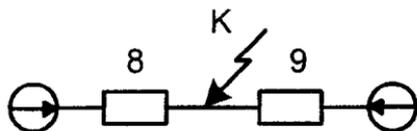
а) Точное приведение (с учетом фактических коэффициентов трансформации) в именованных единицах.

В качестве основной выбираем ступень, на которой находится точка КЗ

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot n_1^2 \cdot n_2^2 = 0,17 \times \\
 &\times \frac{10,5^2 \cdot 0,8}{63} \cdot \left(\frac{121}{10,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,095 \text{ Ом}, \\
 x_2 &= \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot n_2^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{80} \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,0577 \text{ Ом}, \\
 x_3 &= x_0 \cdot l \cdot n_2^2 = 0,4 \cdot 70 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,084 \text{ Ом}, \\
 x_4 &= \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6,3}{40} = 0,104 \text{ Ом}, \\
 x_5 &= 0,45 \text{ Ом}, \\
 x_7 &= x_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = 0,15 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 0,8}{25} = 0,19 \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Приведенное значение фазной ЭДС генератора:

$$\begin{aligned}
 E_{1\phi}' &= E_{1\phi}'' \cdot n_1 \cdot n_2 = \frac{11}{\sqrt{3}} \cdot \frac{121}{10,5} \cdot \frac{6,3}{115} = 4,01 \text{ кВ}, \\
 E_{2\phi} &= E_2'' = \frac{6,6}{\sqrt{3}} = 3,815 \text{ кВ},
 \end{aligned}$$



$$E_{1\phi} = 4,01 \text{ кВ}$$

$$E_{2\phi} = 3,815 \text{ кВ}$$

Рис. 1.2 – Результирующая схема замещения

$$x_8 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 0,7907 \text{ Ом},$$

$$x_9 = x_6 + x_7 = 0,51 \text{ Ом},$$

$$I_{\text{кз}} = \frac{E_{1\phi}}{x_8} + \frac{E_{2\phi}}{x_9} = \frac{4,01}{0,7907} + \frac{3,815}{0,51} = 12,55 \text{ кА}.$$

б) точное приведение (с учетом фактических коэффициентов трансформации) в относительных единицах.

Примем за базисную мощность  $S_6 = 100 \text{ МВА}$  за базисное напряжение основной ступени  $U_{6\text{III}} = 6 \text{ кВ}$ . Тогда базисные напряжения ступеней II и I будут:

$$U_{6\text{II}} = U_{6\text{III}} \cdot \frac{1}{n_2} = 6 \cdot \frac{115}{6,3} = 109,52 \text{ кВ},$$

$$U_{6\text{I}} = U_{6\text{II}} \cdot \frac{1}{n_1} = 109,52 \cdot \frac{10,5}{121} = 9,5 \text{ кВ},$$

$$x_1 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6\text{I}}^2} = 0,17 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{63} \cdot \frac{10,5^2}{9,5^2} = 0,264,$$

$$x_2 = \frac{U_{\text{к\%}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6\text{II}}^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{80} \cdot \frac{121^2}{109,52^2} = 0,16,$$

$$x_3 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6\text{II}}^2} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{109,52^2} = 0,233,$$

$$x_4 = \frac{U_{\text{к\%}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6\text{III}}^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} \cdot \frac{6,3^2}{6^2} = 0,289,$$

$$x_5 = x_{\text{LR}} \cdot \frac{S_6}{U_{6\text{III}}^2} = 0,45 \cdot \frac{100}{6^2} = 1,25,$$

$$x_6 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6\text{III}}^2} = 0,08 \cdot 4 \cdot \frac{100}{6^2} = 0,89,$$

$$x_7 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H} \cdot \frac{U_H^2}{U_{6III}^2} = 0,15 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{25} \cdot \frac{6,3^2}{6^2} = 0,53,$$

$$E_{*1} = \frac{E_1''}{U_{6I}} = \frac{11}{9,5} = 1,158,$$

$$E_{*2} = \frac{E_2''}{U_{6III}} = \frac{6,6}{6} = 1,1,$$

$$x_8 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 2,196,$$

$$x_9 = x_6 + x_7 = 1,42,$$

$$I_{*кз} = \frac{E_{*1}}{x_8} + \frac{E_{*2}}{x_9} = \frac{1,158}{2,196} + \frac{1,1}{1,42} = 1,302,$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6III}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6} = 9,63 \text{ кА},$$

$$I_{кз} = I_{*кз} \cdot I_6 = 1,302 \cdot 9,63 = 12,54 \text{ кА}.$$

в) Приближенное приведение в именованных единицах.

В этом случае считаем, что напряжения на ступенях равны средним номинальным напряжениям, а поэтому:

$$n_1 = \frac{115}{10,5}, \quad n_2 = \frac{6,3}{115}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot n_1^2 \cdot n_2^2 = 0,17 \cdot \frac{10,5^2 \cdot 0,8}{63} \times \\ &\times \left(\frac{115}{10,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,17 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 0,8}{63} = 0,086 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot n_2^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{80} \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = \\ &= \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6,3^2}{80} = 0,052 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

$$x_3 = x_0 \cdot l \cdot n_2^2 = 0,4 \cdot 70 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,078 \text{ Ом},$$

$$x_4 = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6,3^2}{40} = 0,104 \text{ Ом},$$

$$x_5 = 0,45 \text{ Ом},$$

$$x_6 = x_0 \cdot l = 0,08 \cdot 4 = 0,32 \text{ Ом},$$

$$x_7 = x_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = 0,15 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 0,8}{25} = 0,176 \text{ Ом.}$$

Приведенное значение фазной ЭДС генератора:

$$E_{1\phi} = E_{1\phi}'' \cdot n_1 \cdot n_2 = \frac{11}{\sqrt{3}} \cdot \frac{115}{10,5} \cdot \frac{6,3}{115} = \frac{11}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6,3}{10,5} = 3,82 \text{ кВ,}$$

$$E_{2\phi} = E_{2\phi}'' = \frac{6,6}{\sqrt{3}} = 3,815 \text{ кВ,}$$

$$x_8 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 0,770 \text{ Ом,}$$

$$x_9 = x_6 + x_7 = 0,496 \text{ Ом,}$$

$$I_{кз} = \frac{E_{1\phi}}{x_8} + \frac{E_{2\phi}}{x_9} = \frac{3,82}{0,77} + \frac{3,815}{0,496} = 12,65 \text{ кА.}$$

г) Приближенное приведение в относительных единицах.

Базисные напряжения на ступенях при приближенном приведении принимаются равными средним номинальным напряжениям:

$$U_{6I} = U_{срI} = 10,5 \text{ кВ,}$$

$$U_{6II} = U_{срII} = 115 \text{ кВ,}$$

$$U_{6III} = U_{срIII} = 6,3 \text{ кВ.}$$

Определим значения сопротивлений элементов схемы замещения и ЭДС генераторов по формулам (9а ÷ 11а):

$$x_1 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,17 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{63} = 0,216,$$

$$x_2 = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0,131,$$

$$x_3 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6II}^2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{срII}^2} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,212,$$

$$x_4 = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,263,$$

$$x_5 = x_{(0M)} \cdot \frac{S_6}{U_{6III}^2} = x_{(0M)} \cdot \frac{S_6}{U_{срIII}^2} = 0,45 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 1,226,$$

$$x_6 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{6III}^2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{срIII}^2} = 0,08 \cdot 4 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,872,$$

$$x_7 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,15 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{25} = 0,48,$$

$$E_{*1} = \frac{E_1''}{U_{6I}} = \frac{E_1''}{U_{cpI}} = \frac{11}{10,5} = 1,048,$$

$$E_{*2} = \frac{E_2''}{U_{6III}} = \frac{E_2''}{U_{cpIII}} = \frac{6,6}{6,3} = 1,048,$$

$$x_8 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 2,048,$$

$$x_9 = x_6 + x_7 = 1,352,$$

$$I_{*кз} = \frac{E_{*1}}{x_8} + \frac{E_{*2}}{x_9} = \frac{1,048}{2,048} + \frac{1,048}{1,352} = 1,287,$$

$$I_{кз} = I_{*кз} \cdot I_6 = 1,287 \cdot 9,175 = 11,8 \text{ кА},$$

где

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6III}} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{cpIII}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,175 \text{ кА}.$$

### 1.3. Преобразование схем замещения

Для расчета тока КЗ схему замещения упрощают, используя известные методы преобразования схем до элементарного вида, т.е. до схемы, состоящей из результирующей эквивалентной ЭДС и эквивалентного результирующего сопротивления относительно точки КЗ (рис. 1.3), после чего ток в точке КЗ определяют, используя закон Ома.

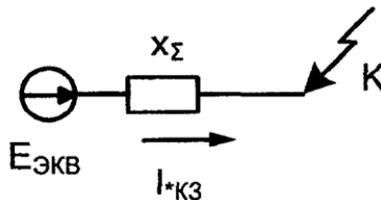


Рис. 1.3 – Результирующая схема замещения

$$I_{*кз} = \frac{E_{ЭКВ}}{X_{\Sigma}},$$

В процессе преобразования схемы производят последовательное и параллельное сложение сопротивлений, замену треугольника со-

противлений звездой и наоборот, замену нескольких источников одним эквивалентным источником с эквивалентной ЭДС  $E_{\text{экв}}$  и эквивалентным сопротивлением  $X_{\text{экв}}$ .

Если расчетная точка КЗ находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, этот узел можно разрезать, сохранив на конце каждой ветви такое же КЗ (рис. 1.4).

Далее полученную схему можно преобразовать относительно любой точки КЗ, учитывая другие ветви с КЗ как обычные ветви с ЭДС, равными нулю.

Довольно часто встречается симметрия схемы замещения относительно точки КЗ. В этом случае при нахождении результирующего эквивалентного сопротивления можно наложить одну часть исходной схемы на другую относительно оси симметрии.

В процессе расчета токов КЗ часто приходится учитывать индивидуальные свойства источников питания. В этом случае в процессе преобразования схемы приходится пользоваться методом коэффициентов токораспределения.

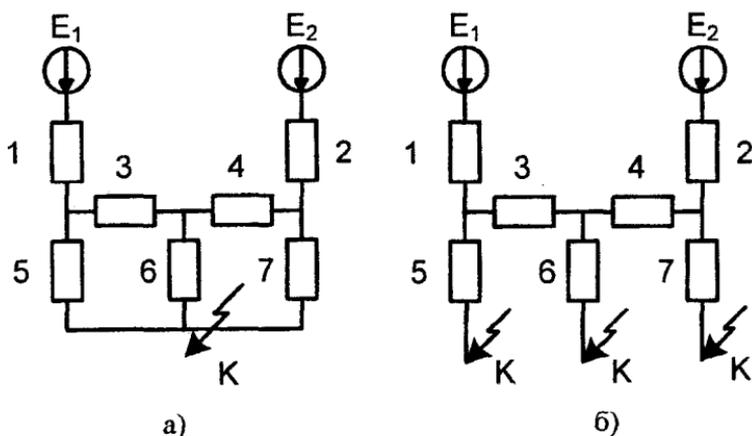


Рис. 1.4 – Пример преобразования схемы:

а) исходная схема; б) схема после рассечения узла

Применение тех или иных методов в процессе преобразования схем показано ниже при решении задач.

## 2. Расчет начального и установившегося токов короткого замыкания

Переходный процесс при коротком замыкании состоит из трех режимов – сверхпереходного, переходного и установившегося. Активные элементы (генераторы, нагрузки) на каждой из стадий переходного процесса учитываются своими ЭДС и сопротивлениями (таблица 1),

Таблица 1

Элементы схемы	Стадии переходного процесса		
	Сверхпереходной режим	Переходный режим	Установившийся режим
Генераторы	$E_*''$ $x_d''$	$E_*'$ $x_d'$	$E_{*q}$ $x_d$
Синхронные двигатели	$E_{*дв}''$ $x_d''$	$E_{*дв}'$ $x_d'$	$E_{*дв}$ $x_d$
Обобщенная мелкомоторная нагрузка	$E_{*н}'' = 0,85$ $x_{*н}'' = 0,35$	$E_{*н} = 0, x_{*н} = 1,2$	
Крупные асинхронные двигатели $P_n > 200$	$E_{*дв}''$ $x_{*дв}''$		

Для определения ЭДС генератора пользуются формулами:

$$E_*'' = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi + I_{*н} \cdot x_d'')^2},$$

$$E_*' = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi + I_{*н} \cdot x_d')^2},$$

$$E_{*q} = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi + I_{*н} \cdot x_d)^2},$$

где  $U_*$ ,  $I_{*н}$  – соответственно напряжение на выводах машины и ток статора в момент, предшествующий КЗ, в относительных единицах при номинальных условиях.

$\varphi$  – угол сдвига фаз тока и напряжения в момент, предшествующий КЗ.

Иногда можно пользоваться более простыми формулами для определения ЭДС.

$$E''_* = U_* + I_{*н} \cdot x''_d \cdot \sin\varphi,$$

$$E'_* = U_* + I_{*н} \cdot x'_d \cdot \sin\varphi,$$

$$E_{*q} = I_{*f} \quad \text{или} \quad E_{*q} = c \cdot I_{*f}$$

$$x_d = \frac{1}{K_c} \quad \text{или} \quad x_d = \frac{C}{K_c}$$

где  $I_{*f}$  — ток возбуждения синхронной машины (СМ) до КЗ;

$C = 1,05 \div 1,2$  — относительное значение ЭДС ненасыщенной СМ при  $I_{*f} = 1$ ;

$K_c$  — отношение короткого замыкания.

Синхронные двигатели, работающие в режиме перевозбуждения, учитываются аналогично синхронным генераторам равновеликой мощности.

ЭДС синхронного электродвигателя при его работе с недовозбуждением может быть определена в зависимости от рассматриваемой стадии переходного процесса по формулам:

$$E''_{*дв} = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi - I_{*н} \cdot x''_d)^2},$$

$$E'_{*дв} = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi - I_{*н} \cdot x'_d)^2},$$

$$E_{*дв} = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi - I_{*н} \cdot x_d)^2},$$

или

$$E''_{*дв} = U_* - I_{*н} \cdot x''_d \cdot \sin\varphi,$$

$$E'_{*дв} = U_* - I_{*н} \cdot x'_d \cdot \sin\varphi.$$

Асинхронные электродвигатели в нормальном режиме работают с малым скольжением, порядка  $1,5 \div 3 \%$ , поэтому в момент КЗ этим скольжением можно пренебречь и рассматривать их как синхронные двигатели, работающие с недовозбуждением, т.е. их сверхпереходную ЭДС определяют как:

$$E''_{*дв} = U_* - I_{*н} \cdot x''_{дв} \cdot \sin\varphi,$$

$$x''_{дв} = \frac{1}{I_{*п}},$$

где  $I_{*п}$  — кратность пускового тока электродвигателя.

Максимально возможное мгновенное значение полного тока короткого замыкания называют ударным током  $i_{уд}$ . Он наступает через полпериода с момента возникновения короткого замыкания, т.е. через 0,01 с.

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I''$$

где  $k_y$  — ударный коэффициент;

$I''$  — начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ.

Ударный коэффициент определяется по формуле:

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

где  $T_a$  — постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ.

Существует несколько способов определения эквивалентной постоянной времени затухания  $T_a$ . Наиболее простой — при котором используется выражение

$$T_{a \text{ экв}} = \frac{x_{* \text{ экв}}(R=0)}{\omega \cdot R_{* \text{ экв}}(x=0)}$$

где  $x_{* \text{ экв}}(R=0)$  и  $R_{* \text{ экв}}(x=0)$  — эквивалентные сопротивления схемы замещения при учете в ней различных элементов исходной расчетной схемы только индуктивными сопротивлениями и только активными сопротивлениями.

Если точка КЗ делит схему на несколько радиальных независимых частей, то ударный ток можно считать как сумму ударных токов от этих частей.

При отсутствии необходимых данных для оценки величины отношения  $x/R$  у отдельных элементов электроэнергетической системы в практических расчетах можно рекомендовать следующие значения  $k_y$ : при КЗ на шинах генератора и СД —  $k_y = 1,9$ , в остальных случаях —  $k_y = 1,8$ ; для крупных АД —  $k_y = 1,4 \div 1,6$ ; для обобщенной мелкомоторной нагрузки  $k_y = 1$ .

Установившаяся стадия переходного процесса наступает когда все возникшие в начальный момент КЗ свободные токи затухли и полностью закончен подъем тока возбуждения под действием АРВ. Этот режим является весьма условным и при принимаемых допу-

щениях возможен, главным образом, при изолированной работе генератора на внешнюю сеть.

При расчетах необходимо знать состояние АРВ. Если АРВ отключено, то установившийся ток можно определить как

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_{*q}}{(x_d + x_{*вн})}$$

АРВ, стремясь поддержать напряжение на выводах генератора равным номинальному, изменяет ток возбуждения и в пределе может его увеличить до  $I_{*f \text{ пред}}$ . Это зависит от соотношения внешнего  $x_{*вн}$  и так называемого критического  $x_{*кр}$  сопротивлений.

Если  $x_{*вн} < x_{*кр}$ , то наступает режим предельного возбуждения, при котором

$$U_* < U_{*ном}; I_{*f} = I_{*f \text{ пред}}$$

если  $x_{*вн} > x_{*кр}$  – режим нормального напряжения, при котором

$$U_* = U_{*ном}; I_{*f} < I_{*f \text{ пред}}$$

Критическое сопротивление, зависящее только от параметров генератора, определяется как

$$x_{*кр} = x_d \cdot \frac{1}{I_{*f \text{ пред}} - 1}$$

Под  $x_{*вн}$  понимают суммарное сопротивление всех элементов сети от шин генератора до точки КЗ.

Задача 2.1 Определить  $I''^{(3)}$ ,  $I'^{(3)}$ ,  $I_\infty^{(3)}$ ,  $i_y^{(3)}$  при КЗ в точке К схемы, представленной на рис. 2.1.

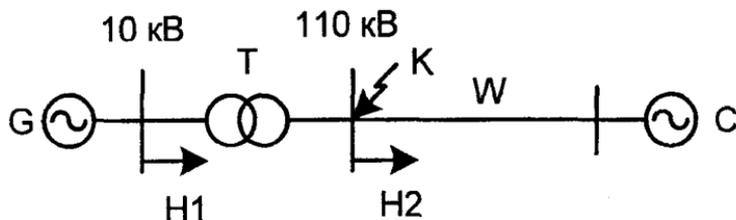


Рис. 2.1 – Расчетная схема сети

Параметры элементов схемы:

Система С:  $S_H = 4000$  МВА;  $x_{*с} = 1,2$ ;

Линия W:  $l = 75$  км;  $x_0 = 0,38$  Ом/км;

Трансформатор Т:  $S_H = 125$  МВА;  $U_k = 10$  %;

Генератор G:  $P_H = 100$  МВт;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $I_{*H} = 0,8$ ;  $x_d'' = 0,12$ ;  
 $x_d' = 0,15$ ;  $K_C = 0,7$ ;  $I_{f\text{пр}} = 4$ ;

Нагрузки Н1 и Н2:  $S_H = 25$  МВА.

1. Расчет сверхпереходного режима трехфазного КЗ.

Решение: Составим схему замещения (рис. 2.2). Сопротивления элементов схемы замещения определяем в относительных единицах, используя приближенное приведение.

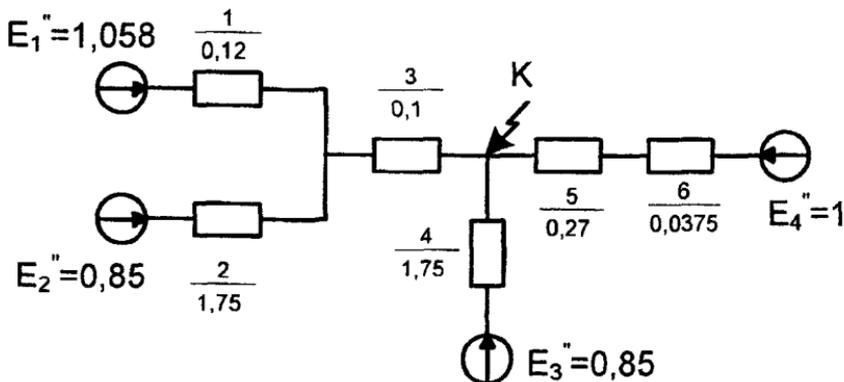


Рис. 2.2 – Схема замещения

В качестве базисных величин принимаем:

$$S_6 = 125 \text{ МВА,}$$

$$U_6 = U_{\text{срн}},$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{срн}}} = \frac{125}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,625 \text{ кА.}$$

Определим параметры схемы замещения:

$$E_1'' = E_{*Г}'' = U_* + I_{*H} \cdot x_d'' \cdot \sin\varphi = 1 + 0,8 \cdot 0,12 \cdot 0,6 = 1,058,$$

$$E_2'' = E_3'' = E_{*H}'' = 0,85; \quad E_4'' = E_{*C} = U_{*C} = 1,$$

$$x_1 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,12 \cdot \frac{125 \cdot 0,8}{100} = 0,12,$$

$$x_2 = x_4 = x_{*H}'' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,35 \cdot \frac{125}{25} = 1,75,$$

$$x_3 = \frac{U_{\text{к\%}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10}{100} \cdot \frac{125}{125} = 0,1,$$

$$x_5 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{срн}}^2} = 0,38 \cdot 75 \cdot \frac{125}{115^2} = 0,27,$$

$$x_6 = x_{*c} \cdot \frac{S_6}{S_H} = 1,2 \cdot \frac{125}{4000} = 0,0375.$$

Преобразуем схему замещения к простейшему виду:

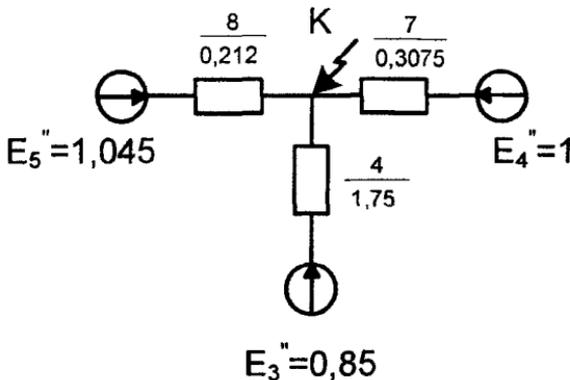


Рис. 2.3 – Преобразованная схема замещения

$$x_7 = x_5 + x_6 = 0,3075,$$

$$x_8 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_3 = 0,212,$$

$$E_5'' = \frac{E_1'' \cdot x_2 + E_2'' \cdot x_1}{x_1 + x_2} = \frac{1,058 \cdot 1,75 + 0,85 \cdot 0,12}{0,12 + 1,75} = 1,045.$$

Определим значения периодической составляющей тока КЗ от каждого из лучей в относительных единицах:

$$I_{*8}'' = \frac{E_5''}{x_8} = \frac{1,045}{0,212} = 4,93,$$

$$I_{*4}'' = \frac{E_3''}{x_4} = \frac{0,85}{1,75} = 0,486,$$

$$I_{*7}'' = \frac{E_4''}{x_7} = \frac{1}{0,3075} = 3,252,$$

Токи лучей в именованных единицах

$$I_8'' = I_{*8}'' \cdot I_6 = 4,93 \cdot 0,625 = 3,08 \text{ кА},$$

$$I_4'' = I_{*4}'' \cdot I_6 = 0,486 \cdot 0,625 = 0,304 \text{ кА},$$

$$I_7'' = I_{*7}'' \cdot I_6 = 3,252 \cdot 0,625 = 2,033 \text{ кА}.$$

Результирующий ток в начальный момент КЗ

$$I'' = I_8'' + I_4'' + I_7'' = 3,08 + 0,304 + 2,033 = 5,417 \text{ кА}.$$

Схему рис. 2.3 можно преобразовать к виду, приведенному на рис. 2.4:

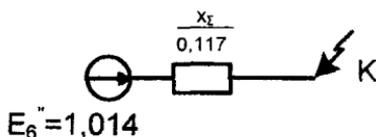


Рис. 2.4 – Результирующая схема замещения

$$x_{\Sigma} = x_8 \parallel x_4 \parallel x_7 = \frac{x_8 \cdot x_4 \cdot x_7}{x_8 \cdot x_4 + x_8 \cdot x_7 + x_4 \cdot x_7} =$$

$$= \frac{0,212 \cdot 1,75 \cdot 0,3075}{0,212 \cdot 1,75 + 0,212 \cdot 0,3075 + 1,75 \cdot 0,3075} = 0,117,$$

$$E_6'' = \frac{E_5'' \cdot y_8 + E_3'' \cdot y_4 + E_4'' \cdot y_7}{y_8 + y_4 + y_7} =$$

$$= \frac{1,045 \cdot 4,717 + 0,85 \cdot 0,57 + 1 \cdot 3,252}{4,717 + 0,57 + 3,252} = 1,014,$$

$$I'' = \frac{E_6}{x_{\Sigma}} \cdot I_6 = \frac{1,014}{0,117} \cdot 0,625 = 5,417 \text{ кА.}$$

Рассчитаем значение  $i_y^{(3)}$ . Поскольку значения ударного коэффициента различно для различных ветвей, то

$$i_y^{(3)} = \sqrt{2} \cdot k_{y8} \cdot I_8'' + \sqrt{2} \cdot k_{y4} \cdot I_4'' + \sqrt{2} \cdot k_{y7} \cdot I_7'' =$$

$$= \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 3,08 + \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 0,304 + \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 2,033 = 13 \text{ кА.}$$

## 2. Расчет переходного режима трехфазного КЗ.

Составим схему замещения (рис. 2.5) и рассчитаем параметры схемы замещения при принятых базисных условиях с учетом рассматриваемой стадии переходного процесса.

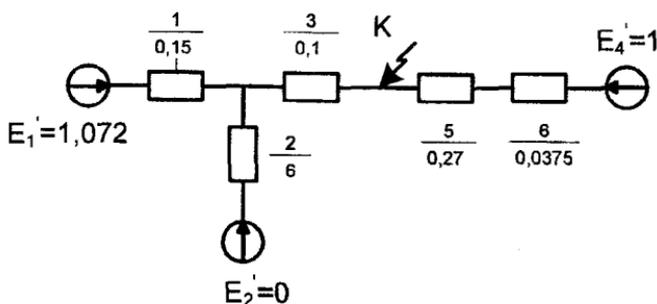


Рис. 2.5 – Схема замещения

$$E'_1 = E'_{*r} = U_* + I_{*H} \cdot x'_d \cdot \sin\varphi = 1 + 0,8 \cdot 0,15 \cdot 0,6 = 1,072,$$

$$x_1 = x'_d \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,15 \cdot \frac{125 \cdot 0,8}{100} = 0,15,$$

$$x_2 = x_{*H} \cdot \frac{S_6}{S_H} = 1,2 \cdot \frac{125}{25} = 6,$$

$$E'_2 = E'_{*H} = 0.$$

Нагрузка Н2 не учитывается, т.к. она подключена к шинам, где находится точка КЗ и она не оказывает никакого влияния на величину тока  $I'$ .

Параметры остальных элементов (трансформатор, ЛЭП, С) не зависят от рассматриваемой стадии, поэтому приняты такими же как и при расчете  $I''$ .

Преобразуем схему замещения к виду, приведенному на рис. 2.6.

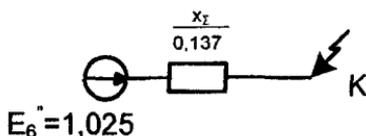


Рис. 2.6

$$E'_5 = \frac{(E_1 \cdot x_2 + E_2 \cdot x_1)}{(x_1 + x_2)} = \frac{1,072 \cdot 6}{0,15 + 6} = 1,046,$$

$$x_7 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_3 = \frac{0,15 \cdot 6}{0,15 + 6} + 0,1 = 0,246,$$

$$x_8 = x_5 + x_6 = 0,27 + 0,0375 = 0,3075,$$

$$E'_6 = \frac{E'_5 \cdot x_8 + E'_4 \cdot x_7}{x_7 + x_8} = \frac{1,046 \cdot 0,3075 + 1 \cdot 0,246}{0,246 + 0,3075} = 1,025,$$

$$x_L = \frac{x_7 \cdot x_8}{x_7 + x_8} = \frac{0,246 \cdot 0,3075}{0,246 + 0,3075} = 0,137,$$

$$I'^{(3)}_* = \frac{E'_6}{x_L} = \frac{1,025}{0,137} = 7,48,$$

$$I'^{(3)} = I'^{(3)}_* \cdot I_6 = 7,48 \cdot 0,625 = 4,676 \text{ кА.}$$

### 3. Расчет установившегося тока – $I_\infty^{(3)}$ .

Рассмотрим расчет установившегося тока для случая, когда АРВ генератора отключено. Составим схему замещения (рис. 2.7)

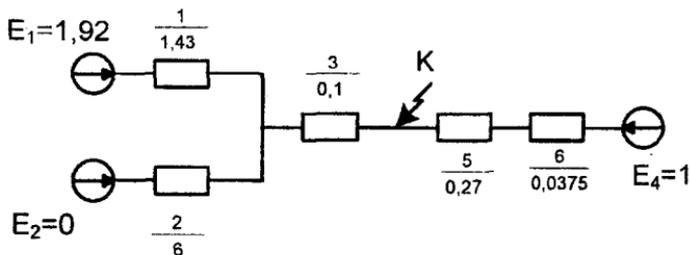


Рис 2.7

Рассчитаем параметры схемы замещения:

$$E_1 = E_{*q} = \sqrt{(U_* \cdot \cos\varphi)^2 + (U_* \cdot \sin\varphi + I_{*H} \cdot x_d)^2} =$$

$$= \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 0,8 \cdot \frac{1}{0,7})^2} = 1,92,$$

$$x_d = \frac{1}{K_c} = \frac{1}{0,7} = 1,43,$$

$$x_1 = x_d \cdot \frac{S_6}{S_H} = 1,43 \cdot \frac{125 \cdot 0,8}{100} = 1,43.$$

Параметры остальных элементов будут такими же как и при расчете  $I'$ .

Преобразуем схему замещения к виду, приведенному на рис. 2.8

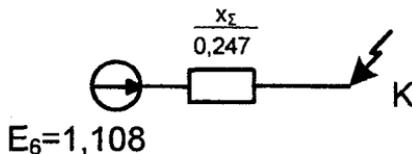


Рис. 2.8

$$E_5 = \frac{E_1 \cdot x_2 + E_2 \cdot x_1}{x_1 + x_2} = \frac{1,96 \cdot 6}{1,43 + 6} = 1,55,$$

$$x_7 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_3 = \frac{1,43 \cdot 6}{1,43 + 6} + 0,1 = 1,255,$$

$$x_8 = x_5 + x_6 = 0,3075,$$

$$E_6 = \frac{E_5 \cdot x_8 + E_4 \cdot x_7}{x_8 + x_7} = \frac{1,55 \cdot 0,3075 + 1 \cdot 1,255}{0,3075 + 1,255} = 1,108,$$

$$x_{\Sigma} = \frac{x_7 \cdot x_8}{x_7 + x_8} = \frac{1,255 \cdot 0,3075}{1,255 + 0,3075} = 0,247,$$

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_6}{x_{\Sigma}} = \frac{1,108}{0,247} = 4,486,$$

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_6 = 4,486 \cdot 0,625 = 2,8 \text{ кА}.$$

Рассмотрим расчет установившегося тока для случая, когда АРВ генератора включено. При наличии АРВ необходимо выяснить в каком режиме находится генератор при коротком замыкании в точке К1. Для выяснения режима определим

$$x_{*\text{вн}} = x_3 \parallel x_2,$$

(смотри рис. 2.7)

$$x_{*\text{вн}} = \frac{0,1 \cdot 6}{0,1 + 6} = 0,098,$$

$$x_{*\text{кр б}} = x_d \cdot \frac{1}{I_{*f \text{ пр}} - 1} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{1}{I_{*f \text{ пр}} - 1} \cdot \frac{S_6}{S_H} =$$

$$= \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1}{4 - 1} \cdot \frac{125 \cdot 0,8}{100} = 0,477,$$

$$x_{*\text{вн}} = 0,098 < x_{*\text{кр б}} = 0,477$$

— имеет место режим предельного возбуждения.

В этом случае схема замещения для расчета установившегося тока КЗ будет:

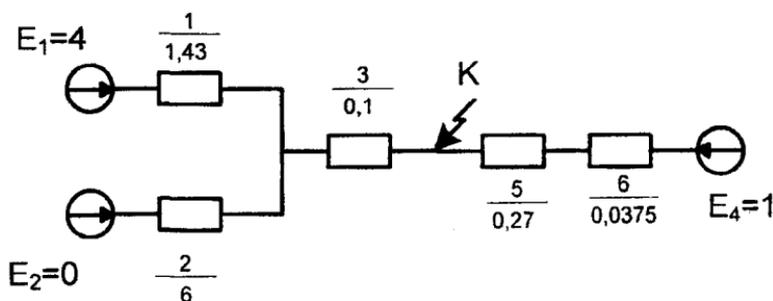


Рис. 2.9

Генератор в схеме учтен

$$E_1 = E_{*q} = I_{*f \text{ пр}} = 4 \quad \text{и} \quad x_1 = x_d \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{S_6}{S_H} = 1,43.$$

Параметры остальных элементов остались такими же как и при расчете  $I_{\infty}$  для случая, когда АРВ был отключен. Аналогично как и в предыдущем случае преобразуем схему рис. 2.9 к виду рис. 2.10:

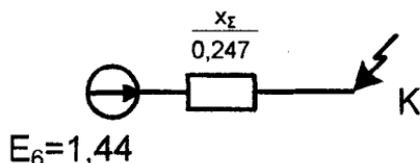


Рис. 2.10

$$E_5 = \frac{E_1 \cdot x_2 + E_2 \cdot x_1}{x_1 + x_2} = \frac{4 \cdot 6}{1,43 + 6} = 3,23,$$

$$x_7 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_3 = 1,255,$$

$$x_8 = x_5 + x_6 = 0,3075,$$

$$E_6 = \frac{E_5 \cdot x_8 + E_4 \cdot x_7}{x_8 + x_7} = \frac{3,23 \cdot 0,3075 + 1 \cdot 1,255}{0,3075 + 1,255} = 1,44,$$

$$x_{\Sigma} = \frac{x_7 \cdot x_8}{x_7 + x_8} = 0,247,$$

$$I_{\infty}^{(3)} = \frac{E_6}{x_{\Sigma}} = \frac{1,44}{0,247} = 5,825,$$

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} \cdot I_6 = 5,825 \cdot 0,625 = 3,64 \text{ кА.}$$

Для того чтобы убедиться в правильности выбора режима генератора необходимо определить ток генератора и сравнить его с критическим током.

$$I_{*кр6} = \frac{U_*}{x_{*кр6}} = \frac{1}{0,477} = 2,096,$$

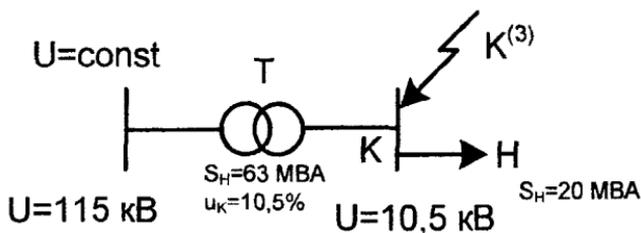
$$I_{кр} = I_{*кр6} \cdot I_6 = 2,096 \cdot 0,625 = 1,31 \text{ кА,}$$

$$I_{*Г} = \frac{E_1}{\left(x_1 + \frac{x_3 \cdot x_2}{x_3 + x_2}\right)} = \frac{4}{\left(1,43 + \frac{0,1 \cdot 6}{6 + 0,1}\right)} = 2,618,$$

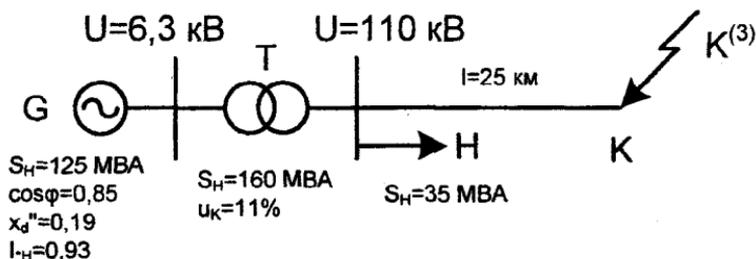
$$I_{Г} = I_{*Г} \cdot I_6 = 2,618 \cdot 0,625 = 1,636 \text{ кА,}$$

$I_{Г} > I_{кр}$  – режим предельного возбуждения.

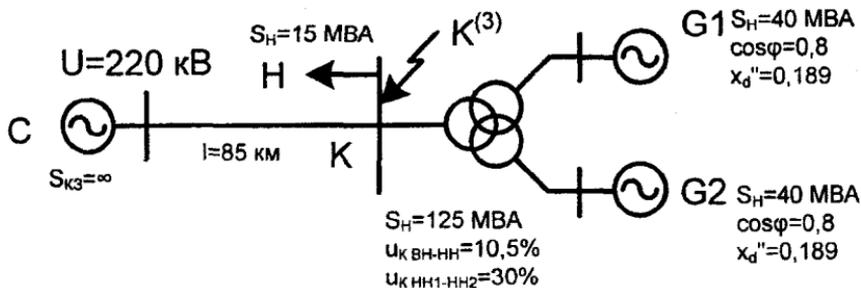
Задача 2.2. Для схемы электрической сети, приведенной ниже, рассчитать наибольшее мгновенное значение полного тока трехфазного КЗ в точке К.



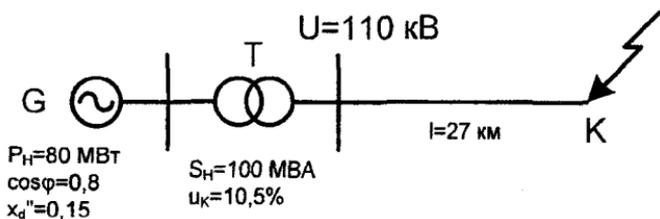
Задача 2.3. Определить сверхпереходной ток в генераторе при трехфазном КЗ в точке К.



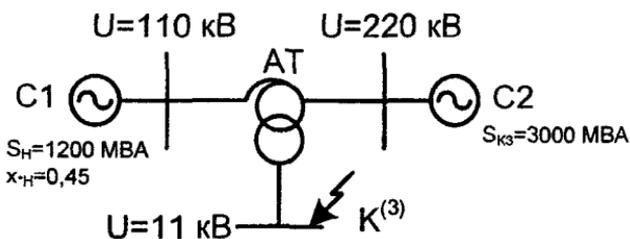
Задача 2.4. Для электрической системы, схема которой приведена ниже, определить значения сверхпереходного тока в каждой ветви схемы при трехфазном КЗ в точке К.



Задача 2.5. Рассчитать начальное действующее значение сверхпереходного тока трехфазного КЗ в точке К.

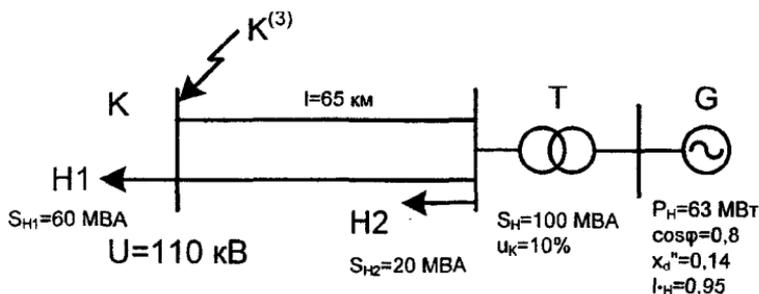


Задача 2.6. Определить: 1) сверхпереходной ток в каждой ветви схемы при трехфазном КЗ в точке К; 2) действующее значение ударного тока.

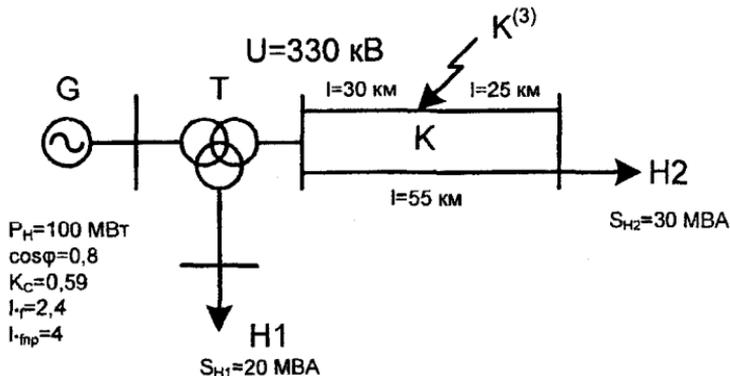


AT1:  $S_H = 250 \text{ MVA}$ ;  $u_{KVH-CH} = 11\%$ ;  $u_{KVH-НН} = 31\%$ ;  
 $u_{КСН-НН} = 11\%$ ;  $S_{НН} = 0,5 \cdot S_H$

Задача 2.7. Для схемы электрической сети, приведенной ниже, рассчитать значения сверхпереходного и ударного токов трехфазного КЗ в точке К.

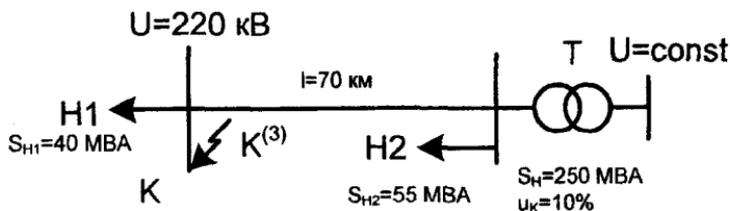


Задача 2.8. Для схемы электрической сети определить ток установившегося режима при трехфазном КЗ в точке К при условии: 1) генератор G снабжен АРВ; 2) генератор G не имеет АРВ.



T1:  $S_H = 200 \text{ МВА}$ ;  $u_{\text{К ВН-СН}} = 11\%$ ;  $u_{\text{К ВН-НН}} = 30\%$ ;  
 $u_{\text{К СН-НН}} = 20\%$

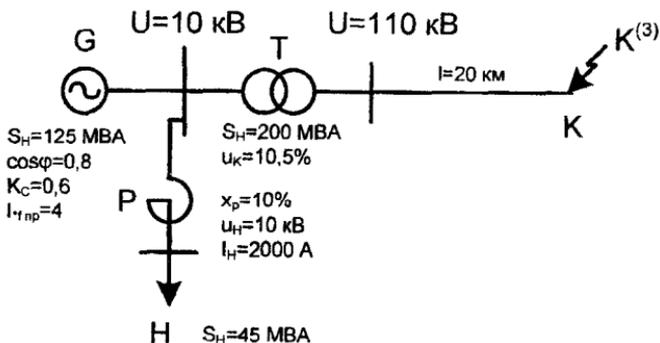
Задача 2.9. Рассчитать установившийся ток трехфазного КЗ в точке К системы.



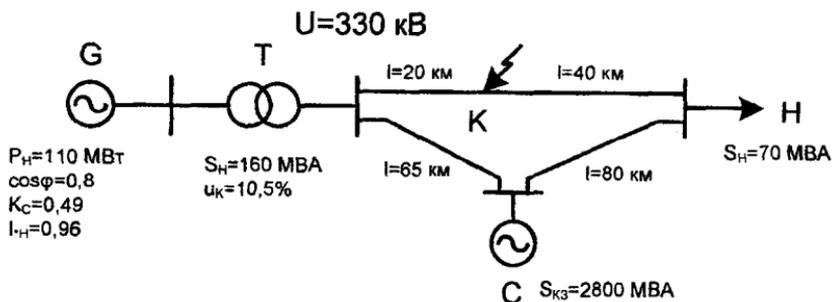
Задача 2.10. Определить ток трехфазного КЗ на выводах генератора при отсутствии АРВ в установившемся режиме.



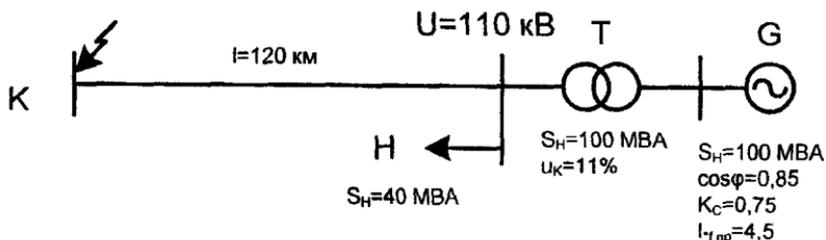
Задача 2.11. Определить ток установившегося режима при трехфазном КЗ в точке К при условии: 1) генератор G снабжен АРВ; 2) генератор G не имеет АРВ.



Задача 2.12. Для схемы сети определить установившийся ток трехфазного КЗ в точке К.



Задача 2.13. Определить режим работы генератора с АРВ и рассчитать установившийся ток трехфазного КЗ в точке К.



### 3. Практические методы расчета симметричных КЗ

В данном параграфе рассмотрен порядок расчета периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых, а также расчет по типовым кривым. Приведенные здесь задачи дают возможность освоить эти методы расчета.

#### 3.1. Порядок расчета периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых по общему изменению тока

Порядок определения периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых по общему изменению следующий:

1. Для расчетной схемы энергосистемы составляют схему замещения, в которую генераторы входят своими сверхпереходными сопротивлениями  $x''_{*d}$ , а вместо значения ЭДС записывается полная мощность  $S_n$  в МВА и указывается тип генератора (турбо- или гидротурбина). Нагрузки в этой схеме должны отсутствовать, за исключением крупных синхронных компенсаторов и двигателей (находящихся вблизи места КЗ), которые учитывают как источники соизмеримой мощности.

2. Задаются базисными условиями и приводят все элементы схемы замещения к принятым базисным условиям.

3. Преобразуют схему замещения к простейшему виду: находят результирующую реактивность  $x_{*рез}$  относительно места КЗ и суммарную мощность источников питания  $S_{н\Sigma}$ . ( $S_{н\Sigma} = S_{н1} + S_{н2} + \dots + S_{нm}$ , МВА).

4. Определяют расчетную реактивность  $x_{*расч}$  по выражению

$$x_{*расч} = x_{*рез} \cdot \frac{S_{н\Sigma}}{S_б}$$

5. Выбирают расчетные кривые, по которым для полученной реактивности  $x_{*расч}$  находят для интересующих моментов времени относительные значения периодической составляющей тока КЗ  $I_{*nkt}$ . При  $x_{*расч} > 3$  величину относительного тока для всех моментов времени определяют так:

$$I_{*nkt} = \frac{1}{x_{*расч}}$$

6. Находят искомую величину периодической составляющей тока КЗ для каждого момента времени  $t$ :

$$I_{nkt} = I_{nki} \cdot I_{n\Sigma}$$

где  $I_{n\Sigma} = S_{n\Sigma} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}})$  - суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к напряжению той ступени, где рассматривается короткое замыкание.

Когда исходная схема содержит генераторы разных типов, то при расчете могут возникнуть формальные затруднения в выборе соответствующих кривых. Тогда нужно воспользоваться расчетными кривыми, ориентируясь на конкретные условия рассматриваемой схемы энергосистемы, отдавая предпочтение тем генераторам, которые в большей степени участвуют в питании точки КЗ.

Задача 3.1. Определить по расчетным кривым тока  $I''$ ,  $I_{0,5}$ ,  $I_{\infty}$  при КЗ в точке К<sup>(3)</sup> для схемы рис. 3.1.

Решение. Задаемся базисными условиями:

$$S_{\delta} = 1000 \text{ MVA}, \quad U_{\delta} = U_{\text{срн}} = 115 \text{ kV}.$$

Составляем эквивалентную схему замещения (рис. 3.2).

Приводим сопротивления элементов схемы к выбранным базисным условиям:

- турбогенераторы G1 и G2:

$$x_1 = x_2 = x_a'' \cdot \frac{S_6}{P_H} \cdot \cos\varphi = 0,2 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{60} = 2,67;$$

- турбогенераторы G3 и G4:

$$x_3 = x_4 = 0,213 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{165} = 1,097;$$

- трансформатор T1:

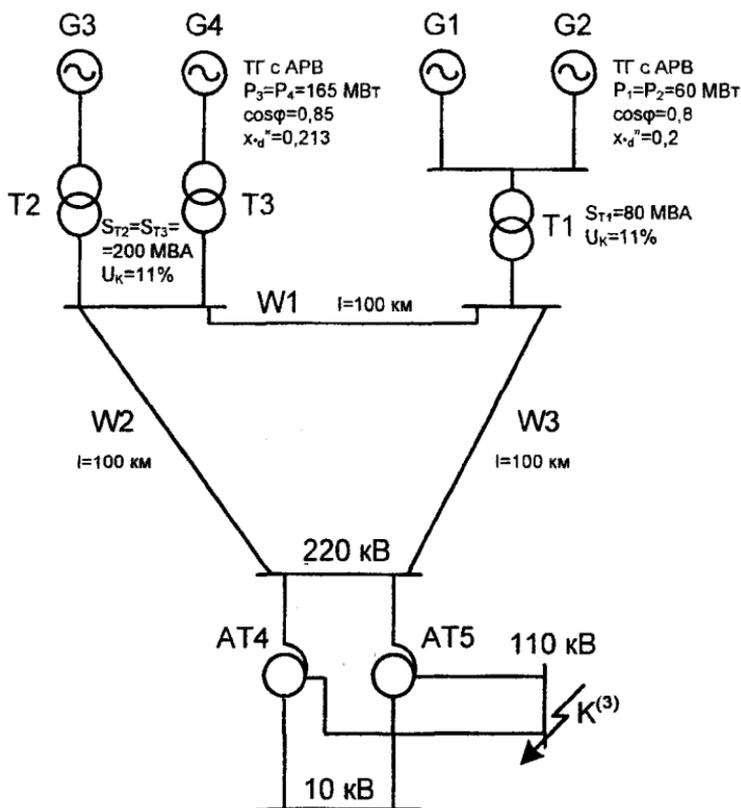
$$x_5 = \frac{U_{k\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{12 \cdot 1000}{100 \cdot 80} = 1,5;$$

- трансформаторы T2 и T3:

$$x_6 = x_7 = \frac{11 \cdot 1000}{100 \cdot 200} = 0,55;$$

- линии W1, W2, W3:

$$x_8 = x_9 = x_{10} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.н}}^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,756;$$



$S_{AT4}=S_{AT5}=200 \text{ MVA}$   $U_{KBC}\% = 11\%$   $U_{KCH}\% = 20\%$   $U_{KBH}\% = 32\%$

Рис. 3.1 – Исходная схема энергосистемы

– автотрансформаторы AT4 и AT5;

$$x_{11} = x_{13} = \frac{0,5 \cdot (U_{KBC}\% + U_{KBH}\% - U_{KCH}\%) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_H}}{100} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot (11 + 32 - 20) \cdot 1000}{100 \cdot 200} = 0,575;$$

$$x_{12} = x_{14} = \frac{0,5 \cdot (U_{KBC}\% + U_{KCH}\% - U_{KBH}\%) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_H}}{100} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot (11 + 20 - 32) \cdot 1000}{100 \cdot 200} = 0.$$

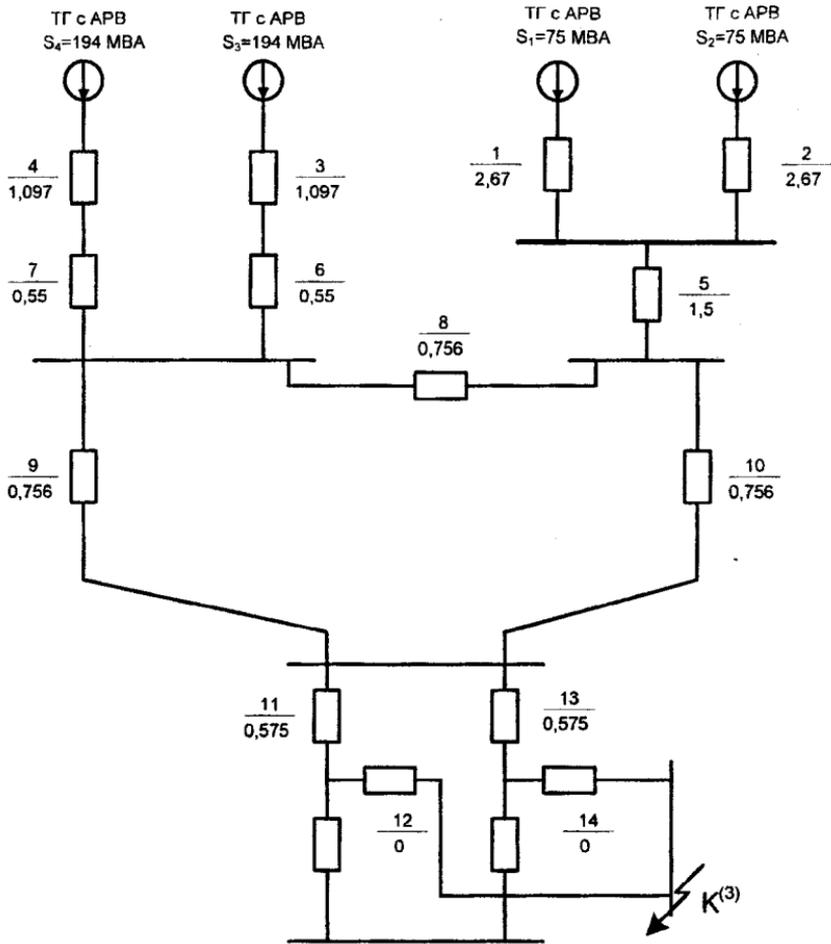


Рис. 3.2 – Схема замещения

Упрощаем схему замещения.

Эквивалентуруем ветви с генераторами G1 и G2 :

$$S_5 = S_1 + S_2 = 75 + 75 = 150 \text{ МВА,}$$

$$x_{15} = \frac{x_1}{2} + x_5 = \frac{2,67}{2} + 1,5 = 2,835,$$

$$S_6 = S_3 + S_4 = \frac{165}{0,85} + \frac{165}{0,85} = 388 \text{ МВА,}$$

$$x_{16} = \frac{x_4 + x_7}{2} = \frac{1,097 + 0,55}{2} = 0,823,$$

$$x_{17} = \frac{x_{11} + x_{12}}{2} = \frac{0,575 + 0}{2} = 0,288.$$

Преобразуем треугольник сопротивлений  $x_8, x_9, x_{10}$  в звезду с сопротивлениями  $x_{18}, x_{19}, x_{20}$

$$x_{18} = \frac{x_8 \cdot x_9}{x_8 + x_9 + x_{10}} = \frac{0,756 \cdot 0,756}{0,756 + 0,756 + 0,756} = 0,252,$$

$$x_{19} = 0,252, \quad x_{20} = 0,252,$$

$$S_7 = S_5 + S_6 = 388 + 150 = 538 \text{ МВА},$$

$$x_{21} = \frac{(x_{16} + x_{18}) \cdot (x_{15} + x_{19})}{x_{16} + x_{15} + x_{18} + x_{19}} =$$

$$= \frac{(0,823 + 0,252) \cdot (2,835 + 0,252)}{0,823 + 0,252 + 2,835 + 0,252} = 0,797,$$

$$x_{22} = x_{20} + x_{17} = 0,252 + 0,288 = 0,54,$$

$$x_{23} = x_{22} + x_{21} = 0,797 + 0,54 = 1,337.$$

Определяем расчетное сопротивление:

$$x_{* \text{ расч}} = x_{23} \cdot \frac{S_7}{S_6} = 1,337 \cdot \frac{538}{1000} = 0,719.$$

По расчетным кривым для турбогенераторов с АРВ определим периодические составляющие токов КЗ в относительных единицах для заданных моментов времени:

$$I_{*n}'' = 1,4; \quad I_{*n0,5} = 1,18; \quad I_{*n\infty} = 1,47.$$

Определим суммарный номинальный ток источников:

$$I_{н\Sigma} = \frac{S_7}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{538}{\sqrt{3} \cdot 115} = 2,7 \text{ кА}.$$

Токи КЗ в именованных единицах:

$$I'' = I_{*n}'' \cdot I_{н\Sigma} = 1,4 \cdot 2,7 = 3,78 \text{ кА},$$

$$I_{(0,5)} = 1,18 \cdot 2,7 = 3,186 \text{ кА},$$

$$I_{\infty} = 1,47 \cdot 2,7 = 3,969 \text{ кА}.$$

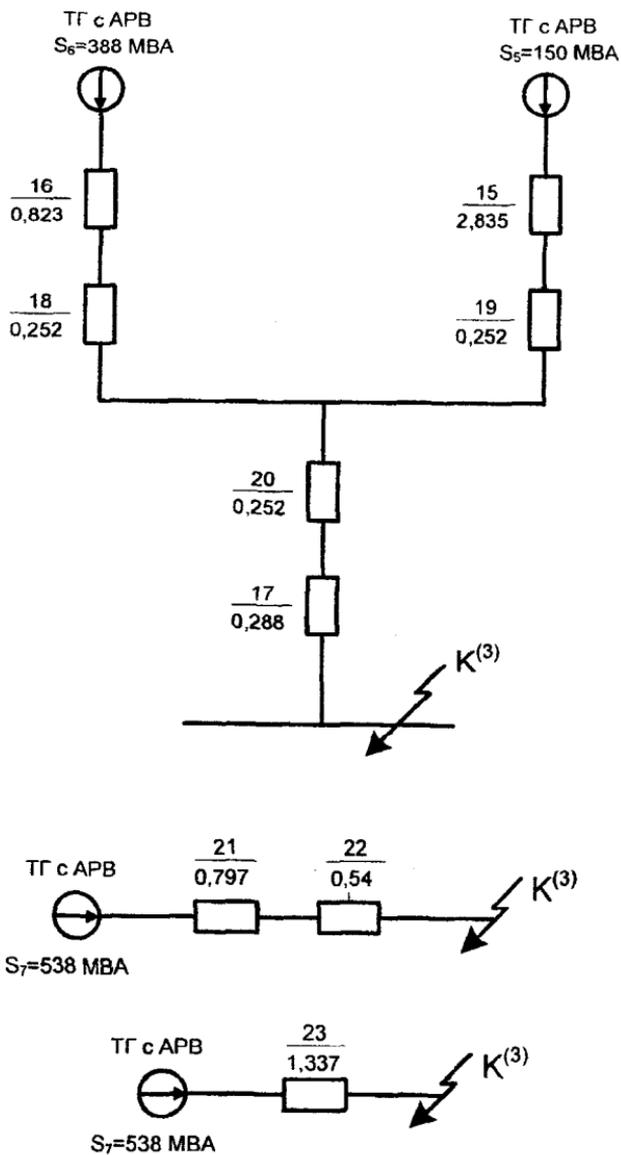
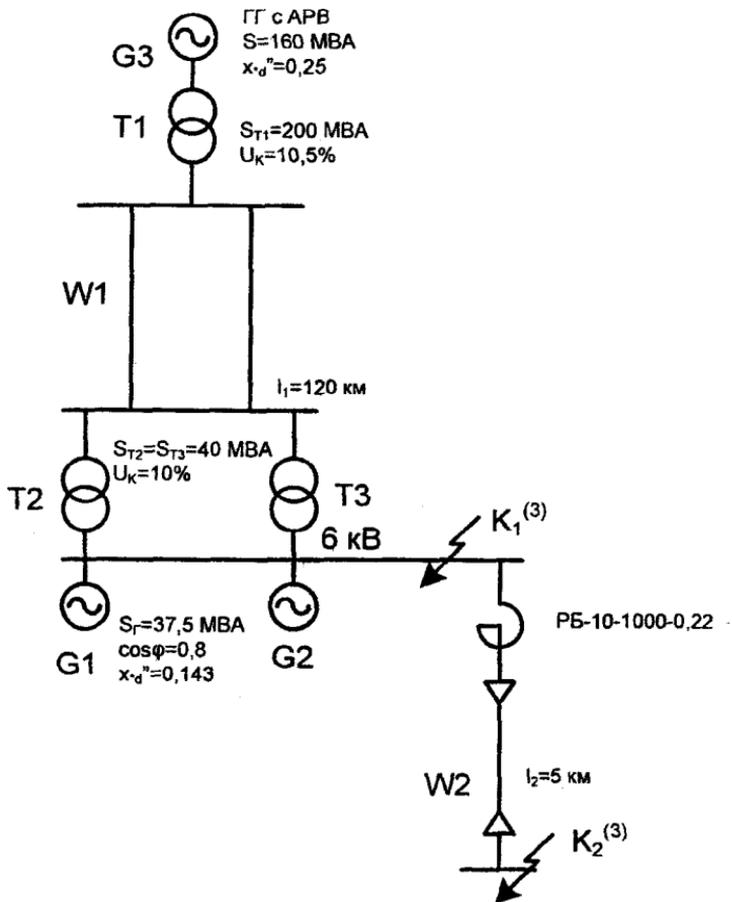
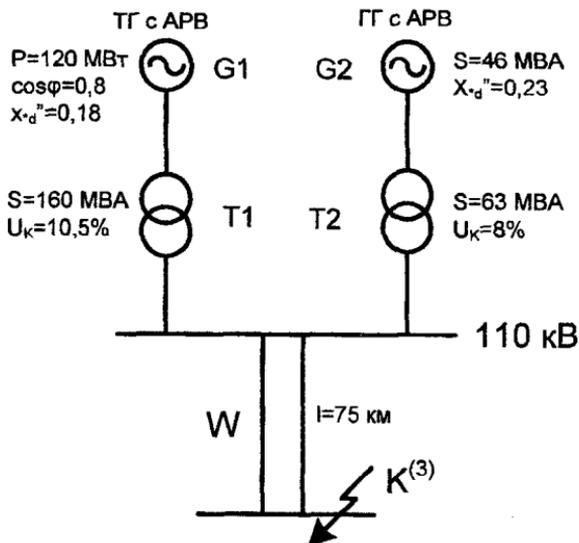


Рис. 3.3 – Упрощение схемы замещения

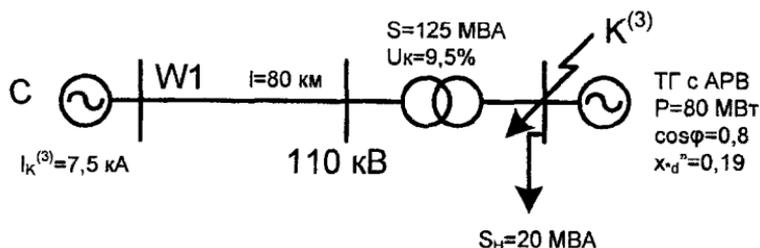
Задача 3.2. При трехфазном КЗ поочередно в точках К1 и К2 приведенной ниже схемы определить значение тока в месте повреждения через 2 с после начала КЗ. Генераторы имеют АРВ.



Задача 3.3. Определить ток трехфазного КЗ в точке К для моментов времени 0,1 с и 1,5 с после начала КЗ.



Задача 3.4. Вычислить ток трехфазного КЗ в точке К для моментов времени  $t = 0$  и  $t = \infty$ .



3.2. Порядок расчета периодической составляющей тока КЗ с помощью расчетных кривых по индивидуальному изменению тока

В тех случаях, когда в заданной схеме имеются генераторы разных типов с АРВ и без АРВ, а также система бесконечной мощности, рекомендуется выполнять расчеты по индивидуальному изменению тока.

1. После составления схемы замещения и задания базисных условий приводят действительную схему замещения энергосистемы к условной радиальной, каждая ветвь которой соответствует выделяемому источнику или группе однотипных источников и связана с точкой КЗ (рис. 3.4).

Преобразование схемы выполняют с использованием коэффициентов токораспределения. Источники непосредственно связанные с точкой КЗ, а также источники бесконечной мощности следует рассматривать отдельно от остальных источников питания.

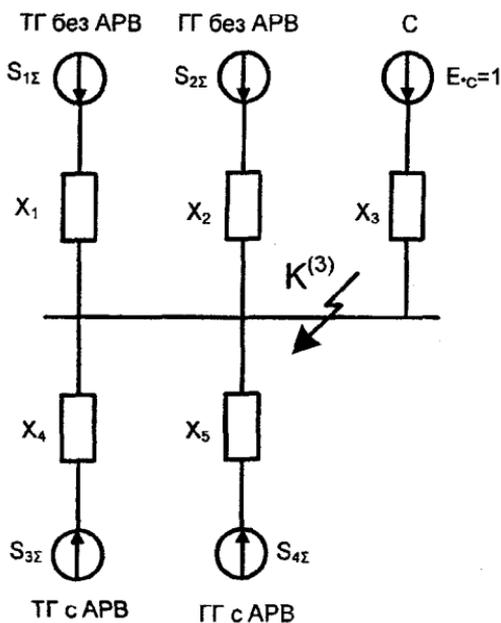


Рис. 3.4 – Схема сети, преобразованная к радиальному виду

2. Определяют расчетные значения сопротивлений каждой из ветвей, исключая ветвь системы

$$x_{i\text{расч}} = x_i \cdot \frac{S_{i\Sigma}}{S_6}$$

где  $x_i$  – результирующее сопротивление  $i$ -ой ветви;

$S_{i\Sigma}$  – суммарная мощность источников питания  $i$ -ой ветви.

3. Воспользовавшись  $x_{i\text{расч}}$  каждой из ветвей по соответствующим расчетным кривым определяют относительные значения пещи

риодических составляющих тока для интересующих моментов времени для каждой из ветвей  $I_{*nti}$ .

Если  $x_{\text{расч}}$  какой-то из ветвей будут больше 3, то:

$$I_{*nti} = \frac{1}{x_{i\text{расч}}}.$$

4. Определяют суммарные номинальные токи источников питания  $I_{\Sigma\text{ном}i}$  каждой из ветвей, приведенные к той ступени напряжения, на которой находится точка КЗ.

$$I_{\Sigma\text{ном}i} = \frac{S_{i\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}}},$$

где  $U_{\text{ср.н}}$  - среднее номинальное напряжение в точке КЗ.

5. Относительное значение тока для любого момента времени для ветви системы определяют как

$$I_{*ct} = \frac{1}{x_3}.$$

6. Определяют базисный ток в точке КЗ:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}.$$

7. Определяют действительное значение тока КЗ в точке для соответствующих моментов времени, как сумму токов всех ветвей

$$I_{nt} = \sum_{i=1}^n I_{*nti} \cdot I_{\Sigma\text{ном}i} + I_{*ct} \cdot I_6, \text{ кА.}$$

8. В случае подключенной к точке КЗ нагрузки ее следует учесть при определении тока КЗ в начальный момент времени и для уточнения ударного тока КЗ

$$I_{\text{н}}'' = \frac{E_{*н}''}{x_{*н}} \cdot I_{\text{нн}} = \frac{0,85}{0,35} \cdot I_{\text{нн}} = 2,43 \cdot I_{\text{нн}},$$

где  $I_{\text{нн}}$  - номинальный ток нагрузки, равный:

$$I_{\text{нн}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}}},$$

$S_{\text{н}}$  - номинальная мощность нагрузки.

Ударный ток от нагрузки:

$$i_{\text{ун}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{ун}} \cdot I_{\text{н}}'',$$

здесь  $k_{\text{ун}}=1$  - ударный коэффициент для обобщенной нагрузки.

Задача 3.5. При трехфазном коротком замыкании в точке К схемы представленной на рис. 3.5, определить величину тока через 0,5 с после начала КЗ по расчетным кривым. Секционный выключатель замкнут.

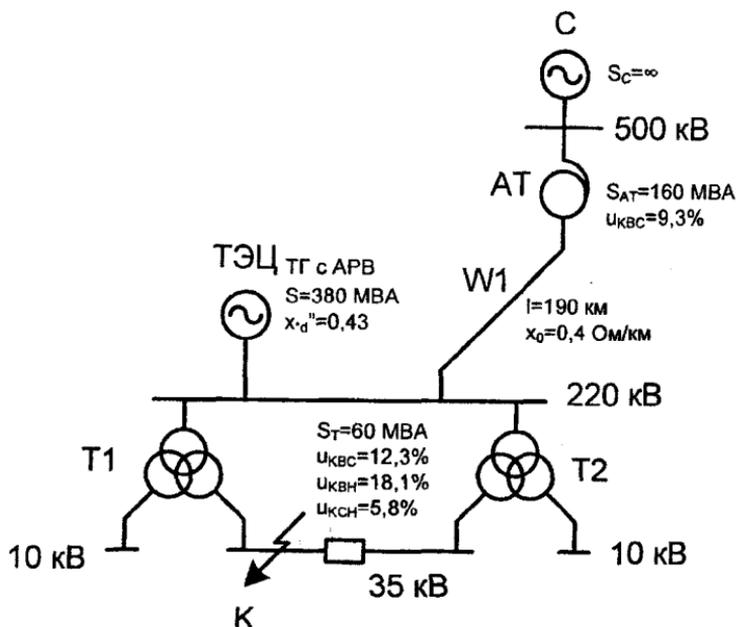


Рис. 3.5 – Исходная схема

Решение. Примем  $S_6=600$  МВА,  $U_6 = U_{ср.н} = 37$  кВ. Сопротивления элементов схемы замещения (рис. 3.6) при базисных условиях будут:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x_{*d}'' \cdot \frac{S_6}{S_{ТЭЦ}} = 0,43 \cdot \frac{600}{380} = 0,68, \\
 x_2 &= \frac{U_{квс\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{9,3 \cdot 600}{100 \cdot 160} = 0,35, \\
 x_3 &= x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{ср.н}^2} = 0,4 \cdot 190 \cdot \frac{600}{230^2} = 0,86, \\
 x_4 &= x_5 = \frac{0,5 \cdot (U_{квс\%} + U_{квн\%} - U_{кчн\%})}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \\
 &= \frac{0,5 \cdot (12,3 + 18,1 - 5,8) \cdot 600}{100 \cdot 60} = 1,23,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_6 = x_7 &= \frac{0,5 \cdot (U_{\text{КВС}\%} + U_{\text{КСН}\%} - U_{\text{КВН}\%})}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \\
 &= \frac{0,5 \cdot (12,3 + 5,8 - 18,1) \cdot 600}{100 \cdot 60} \approx 0, \\
 x_8 = x_9 &= \frac{0,5 \cdot (U_{\text{КВН}\%} + U_{\text{КСН}\%} - U_{\text{КВС}\%})}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \\
 &= \frac{0,5 \cdot (18,1 + 5,8 - 12,3) \cdot 600}{100 \cdot 60} = 0,58.
 \end{aligned}$$

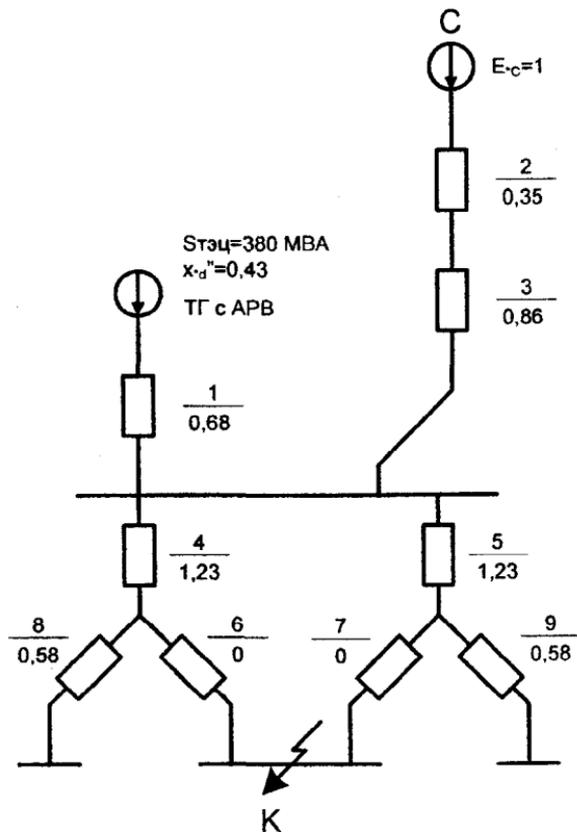


Рис. 3.6 – Схема замещения

Преобразуем схему к точке КЗ К.

$$x_{10} = x_2 + x_3 = 0,35 + 0,86 = 1,21,$$

$$x_{11} = x_4 \parallel x_5 = \frac{x_4 \cdot x_5}{x_4 + x_5} = \frac{1,23}{2} = 0,615.$$

Схема замещения после преобразования примет вид (рис. 3.7)

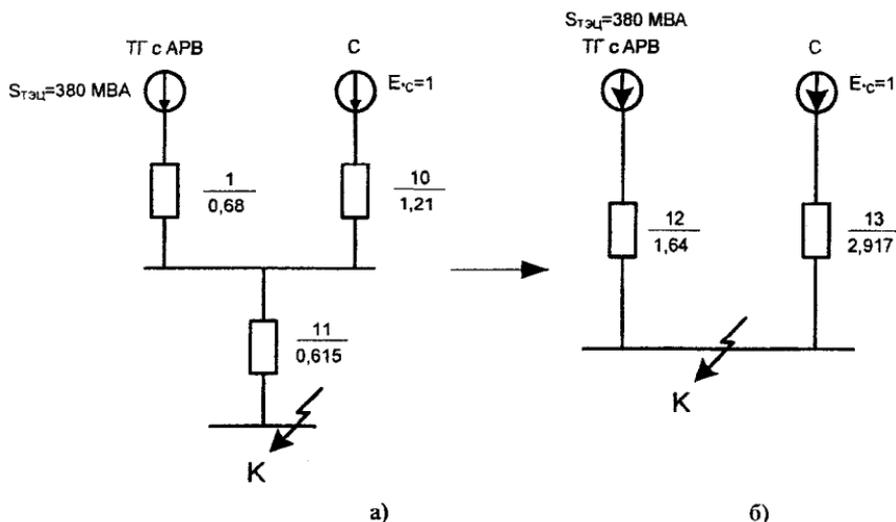


Рис. 3.7 – Преобразование схемы замещения

Чтобы перейти к схеме вида рис. 3.7б, воспользуемся методом коэффициентов токораспределения:

$$x_{\text{экв}} = x_1 \parallel x_{10} = \frac{0,68 \cdot 1,21}{0,68 + 1,21} = 0,435,$$

$$C_1 = \frac{x_{\text{экв}}}{x_1} = \frac{0,435}{0,68} = 0,64, \quad C_2 = \frac{x_{\text{экв}}}{x_2} = \frac{0,435}{1,21} = 0,36,$$

$$x_{\Sigma} = x_{\text{экв}} + x_{11} = 0,435 + 0,615 = 1,05,$$

$$x_{12} = \frac{x_{\Sigma}}{C_1} = \frac{1,05}{0,64} = 1,64, \quad x_{13} = \frac{x_{\Sigma}}{C_2} = \frac{1,05}{0,36} = 2,917.$$

Расчетное сопротивление ветви станции:

$$x_{\text{расч}} = x_{12} \cdot \frac{S_{\text{ТЭЦ}}}{S_6} = 1,64 \cdot \frac{380}{600} = 1,04,$$

для которой по расчетным кривым для турбогенераторов с АРВ при  $t=0,5$  с находим:  $I_{*t=0,5}=0,85$ .

Тогда искомый ток при КЗ в точке К будет:

$$I_K = I_{*t=0,5} \cdot \frac{S_{\text{ТЭЦ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}}} + \frac{1}{x_{13}} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}}} =$$

$$= 0,85 \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 37} + \frac{1}{2,917} \cdot \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 37} = 8,25 \text{ кА.}$$

### 3.3. Порядок расчета токов КЗ методом типовых кривых

Расчетные типовые кривые (рис. 3.8) представляют собой зависимость от времени периодической слагающей тока трехфазного КЗ синхронной машины, отнесенной к начальному току КЗ, при разных удаленностях точки короткого замыкания.

Удаленность фиксируется отношением:

$$\frac{I_{нг}''}{I_{г.ном}} = I_{ог(ном)}.$$

или начальным относительным током КЗ генератора для заданной расчетной схемы.

Типовые кривые являются унифицированными и построены для расчета токов КЗ от турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, независимо от типа, параметров и конструктивных особенностей машин.

Графоаналитический метод определения периодической слагающей тока генератора  $I_{н.л.г.}$  по кривым рис. 3.8,а применительно к одному источнику питания сводится к следующему:

1. Рассчитывают результирующее сопротивление  $x_{*рез.б}$  до точки короткого замыкания;

2. Вычисляют периодическую слагающую начального тока  $I_{нг}''$  в месте КЗ от генератора по выражению:

$$I_{нг}'' = \frac{E_*'' \cdot I_B}{x_{*рез.б}}$$

3. Находят электрическую удаленность  $I_{нг}''/I_{г.ном}$  точки КЗ. Если она окажется дробным числом, то ее округляют до ближайшего целого числа или производят экстраполяцию кривых рис. 3.8,а. Номинальный ток генератора рассчитывается по формуле:

$$I_{г.ном} = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_{ср.н} \cdot \cos \varphi}$$

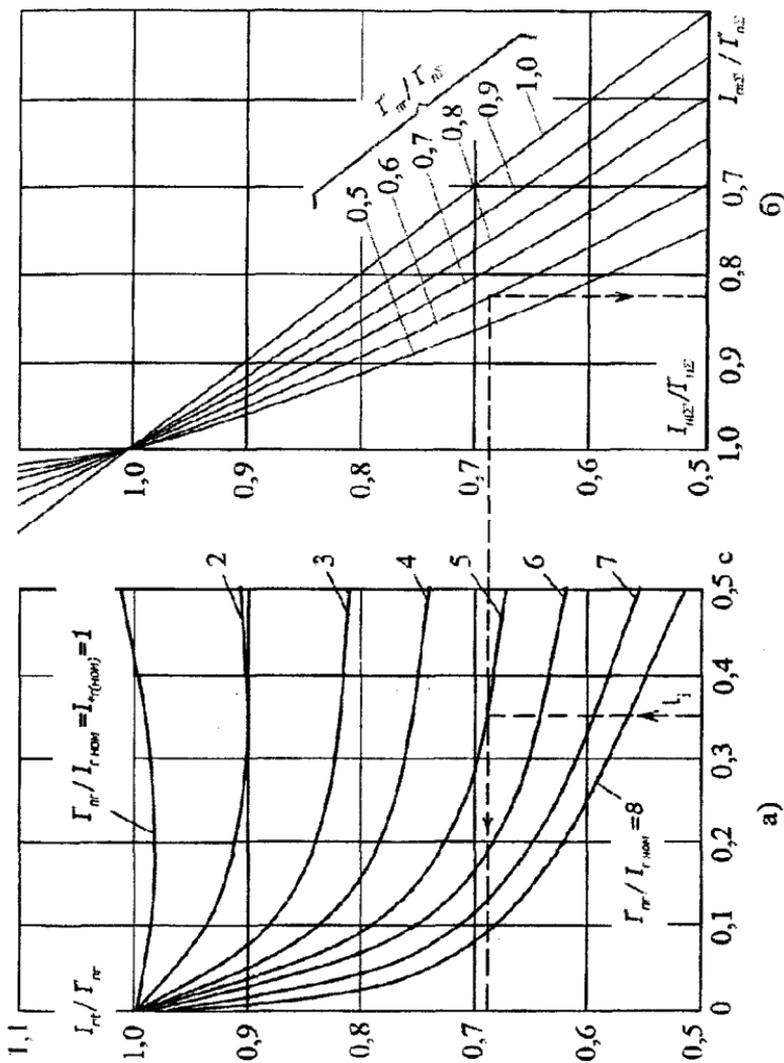


Рис. 3.8 — Типовые кривые изменения во времени тока КЗ синхронной машины при разных удаленностях точки КЗ а) при питании КЗ от генератора; б) при питании КЗ от генератора и системы

4. Определяют отношение  $v = I_{nt}''/I_{n\Gamma}''$  по типовым кривым на основе уже известного отношения  $I_{n\Gamma}''/I_{\Gamma.\text{ном}}$  и момента времени  $t$ .

5. Рассчитывают периодическую слагающую тока КЗ для момента времени  $t$ :

$$I_{nt}'' = v \cdot I_{n\Gamma}''.$$

При связи генератора и электрической системы с точкой КЗ через общее сопротивление  $x_k$  (рис. 3.9) расчет периодической слагающей тока КЗ выполняют в следующем порядке:

1. По исходной расчетной схеме составляют схему замещения и находят результирующее индуктивное сопротивление  $x_{*\text{рез}}$  и суммарную ЭДС схемы  $E_{*\Sigma}''$  для определения начального значения периодической слагающей тока в точке КЗ по формуле:

$$I_{n\Sigma}'' = \frac{E_{*\Sigma}'' \cdot I_6}{x_{*\text{рез}}}.$$

2. Вычисляют начальное значение периодической слагающей тока в генераторной ветви пользуясь выражением:

$$I_{n\Gamma}'' = \frac{E_{*\Sigma}'' \cdot I_6 - I_{n\Sigma}'' \cdot x_{*k}}{x_{*\Gamma}}.$$

3. Определяют отношения  $I_{n\Gamma}''/I_{\Gamma.\text{ном}}$  и  $I_{n\Gamma}''/I_{n\Sigma}''$  для начального момента времени;

4. По кривой  $I_{nt}''/I_{n\Gamma}'' = f(t)$  (рис. 3.8а) при известном значении  $I_{n\Gamma}''/I_{\Gamma.\text{ном}}$  для расчетного момента времени  $t$  находят отношение  $I_{nt\Gamma}''/I_{n\Gamma}''$  и по нему для соответствующей кривой  $I_{n\Gamma}''/I_{n\Sigma}''$  (рис. 3.8б) устанавливают значение  $\mu = I_{nt\Sigma}''/I_{n\Sigma}''$ ;

5. По найденному отношению  $\mu$  и ранее найденному току  $I_{n\Sigma}''$  определяют периодическую слагающую искомого тока для момента времени  $t$   $I_{nt\Sigma}'' = \mu \cdot I_{n\Sigma}''$ .

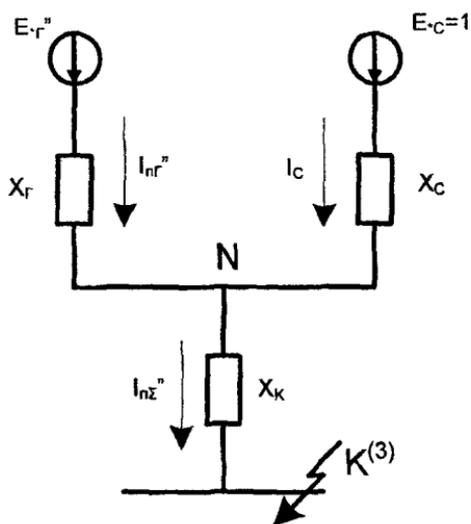


Рис. 3.9

Задача 3.6. Определить ток трехфазного КЗ в точке К (рис. 3.10) в момент времени  $t=0,2$  с.

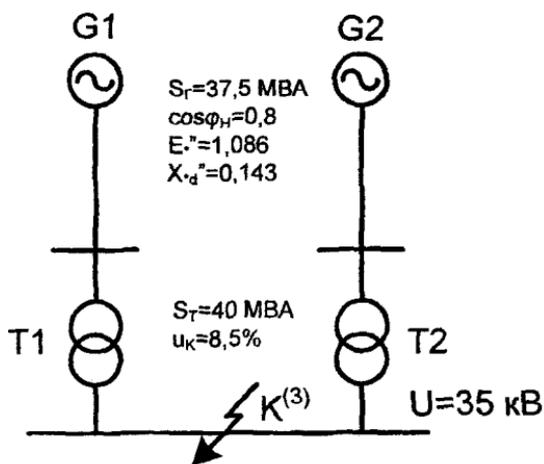


Рис. 3.10 – Расчетная схема

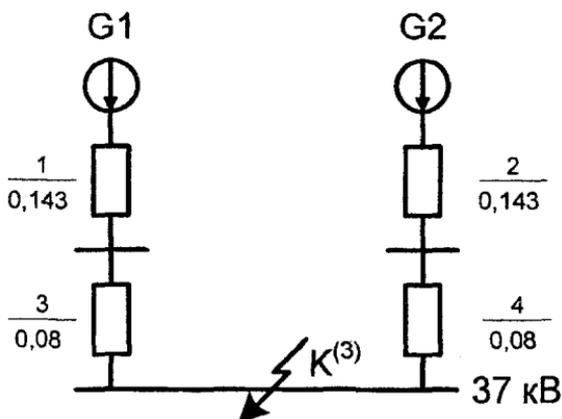


Рис. 3.11 – Схема замещения

Решение. 1. Задаются базисными условиями

$$S_6 = 37,5 \text{ МВА}, \quad U_6 = 37 \text{ кВ}$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{37,5}{\sqrt{3} \cdot 37} = 0,585 \text{ кА}$$

2. Сопротивление элементов схемы замещения (рис.3.11) приводим к базисным условиям:

$$x_1 = x_2 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_r} = \frac{0,143 \cdot 37,5}{37,5} = 0,143,$$

$$x_3 = x_4 = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_T} = \frac{8,5 \cdot 37,5}{100 \cdot 40} = 0,08.$$

3. Номинальный ток каждого генератора:

$$I_{г,ном} = \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{37,5}{\sqrt{3} \cdot 35} = 0,619 \text{ кА}.$$

4. Оба генератора находятся в одинаковых условиях относительно точки КЗ. Поэтому рассмотрим их как эквивалентный генератор с результирующим сопротивлением:

$$x_{*рез} = \frac{x_1 + x_3}{2} = \frac{0,143 + 0,08}{2} = 0,111.$$

5. Начальный ток, создаваемый эквивалентным генератором, при трехфазном КЗ в точке К:

$$I_{\Gamma}^{(3)} = \frac{E_* \cdot I_G}{x_{*рез}} = \frac{1,086 \cdot 0,585}{0,111} = 5,725 \text{ кА.}$$

6. Отношение тока эквивалентного генератора при трехфазном КЗ к номинальному току отдельных генераторов:

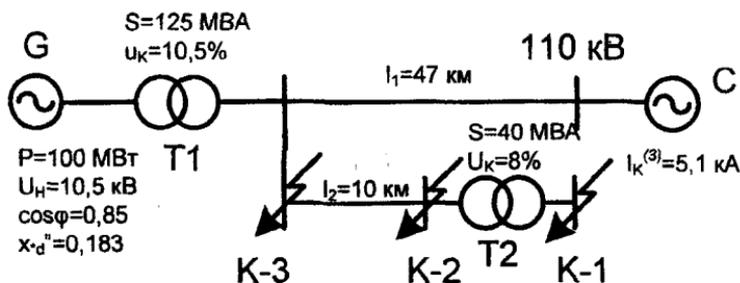
$$\frac{I''}{I_{\Gamma.ном}} = \frac{I_{\Gamma}^{(3)}}{2I_{\Gamma.ном}} = \frac{5,725}{2 \cdot 0,619} = 4,62.$$

7. По типовым кривым (рис.3.8а) для  $t = 0,2$  с и отношения  $I'' / I_{\Gamma.ном} = 4,62$  находим  $I_{nt} / I'' = 0,75$ .

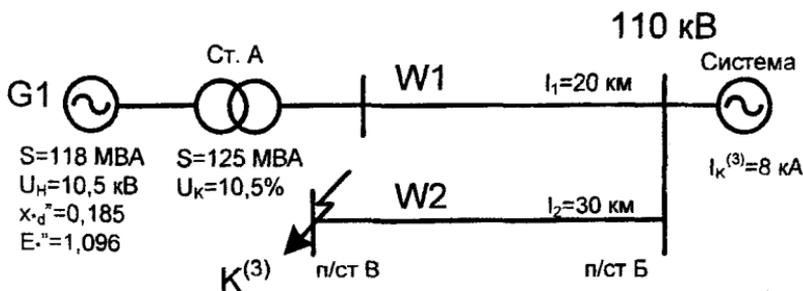
8. Ток трехфазного КЗ в точке К, создаваемый эквивалентным генератором в момент времени  $t = 0,2$  с:

$$I_{nt=0,2} = \frac{I_{nt}}{I''} \cdot I_{\Gamma}^{(3)} = 0,75 \cdot 5,725 = 4,29 \text{ кА.}$$

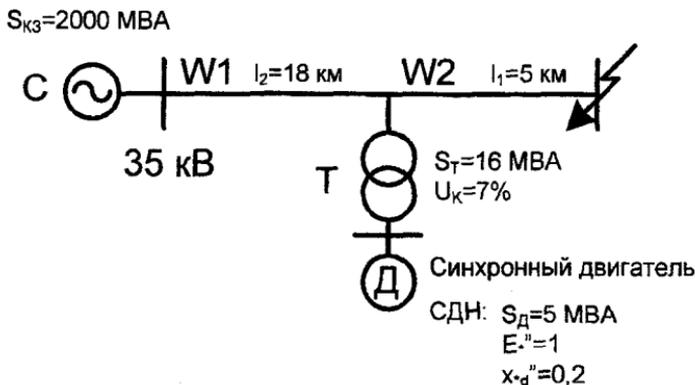
Задача 3.7. Вычислить ток трехфазного КЗ для  $t = 0,1$  с в точках К-2 и К-3 и для  $t = 0,2$  с в точке К-1 следующей схемы:



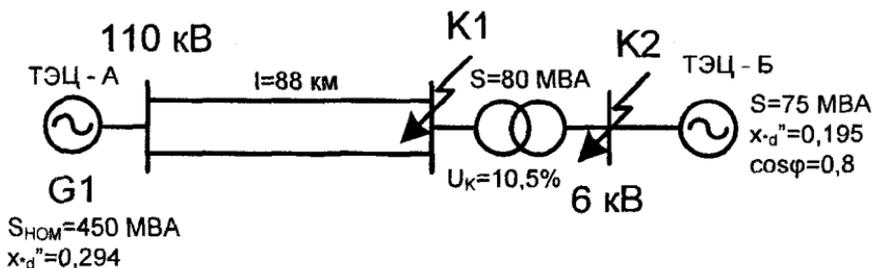
Задача 3.8. Определить ток трехфазного КЗ на шинах 110 кВ п/ст В для  $t=0,3$  с



Задача 3.9. Определить ток трехфазного КЗ через 0,1 с в точке К схемы.



Задача 3.10. Определить токи трехфазного КЗ для  $t = 0,1 \text{ с}$  в точке К-1 и для  $t = 0,2 \text{ с}$  в точке К-2.



#### 4. Расчет переходного процесса при однократной поперечной несимметрии

В этом параграфе приведен порядок расчета несимметричных коротких замыканий.

Расчеты несимметричных КЗ проводят с использованием метода симметричных составляющих, согласно которому любая несимметричная трехфазная система напряжений, токов, потоков и т.п. заменяется тремя симметричными трехфазными системами прямой, обратной и нулевой последовательности.

Порядок расчета несимметричных КЗ следующий:

1. Составляются схемы замещения отдельных последовательностей.

2. Рассчитываются параметры элементов схем замещения (приводятся к одной ступени трансформации точным или приближенным приведением) и определяются результирующие сопротивления схем отдельных последовательностей относительно точки КЗ, а также результирующая ЭДС из схемы замещения прямой последовательности. Если схема замещения прямой последовательности содержит более одной ЭДС, то их эквивалентирование производится относительно начала и конца схемы.

3. Определяют величину шунта короткого замыкания  $x_{\Delta}^{(n)}$ , где  $n$  – вид несимметричного КЗ.

4. По правилу эквивалентности прямой последовательности определяют величину тока прямой последовательности в относительных единицах:

$$I_{*к1}^{(n)} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}}$$

5. Вычисляют полный ток в месте КЗ с учетом коэффициента  $m^{(n)}$ , характеризующего рассчитываемый вид КЗ  $I_k = I_{*к1}^{(n)} \cdot m^{(n)} \cdot I_6$ .

При необходимости все остальные величины симметричных составляющих токов и напряжений при любом несимметричном КЗ могут быть определены через ток прямой последовательности  $I_{к1}^{(n)}$  по выражениям приведенным в [4].

6. Если расчет ведется по расчетным кривым с учетом индивидуального затухания токов отдельных генерирующих ветвей, то после нахождения результирующих сопротивлений в относительных единицах определяют расчетные сопротивления генерирующих ветвей. Зная суммарные сопротивления отдельных последовательностей, определяют расчетные сопротивления выделяемых генерирующих ветвей по выражению:

$$x_{*расч} = (x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}) \cdot \frac{S_{\Sigma i}}{S_6 \cdot C},$$

где  $x_{1\Sigma}$  – суммарное сопротивление схемы замещения прямой последовательности в относительных единицах, приведенные к базисным условиям;

$S_{\Sigma}$  – суммарная номинальная мощность генераторов выделенной ветви, МВА;

$C$  – коэффициент токораспределения для той же ветви, определяемый из схемы замещения прямой последовательности.

По найденной расчетной реактивности при данном виде КЗ по соответствующим расчетным кривым находят значение относительного тока прямой последовательности в рассматриваемый момент времени  $t$ .

Если в схеме присутствует источник бесконечной мощности, то реактивность его ветви определяется как:

$$x = (x_{1c} + x_{\Delta}^{(n)}) / C_c,$$

где  $C_c$  – коэффициент токораспределения ветви системы.

Поскольку расчет данным методом является достаточно приближенным, то можно не подсчитывать суммарный реактанс схемы обратной последовательности, и принять  $x_2 \approx x_1$ .

Величина периодической составляющей тока в месте несимметричного КЗ при расчете по общему изменению будет равна:

$$I_{*t}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{*kt(1)}^{(n)} \cdot I_{\Sigma n},$$

а по методу индивидуального затухания:

$$I_{*kt}^{(n)} = m^{(n)} \cdot (I_{*1t1}^{(n)} \cdot I_{\Sigma n1} + I_{*1t2}^{(n)} \cdot I_{\Sigma n2} + I_6/x_{*c}),$$

где  $I_{\Sigma n1}$ ,  $I_{\Sigma n2}$  – суммарные номинальные токи генераторов, приведенные к напряжению ступени КЗ;

$I_{*1t1}^{(n)}$ ,  $I_{*1t2}^{(n)}$  – относительные токи прямой последовательности, найденные по расчетным кривым для выделенных ветвей 1, 2 и т.д.

7. Если при КЗ требуется определить токи и напряжение в других точках схемы, то симметричные составляющие токов и напряжений распределяются в схемах замещения соответствующих последовательностей. При этом необходимо учитывать группы соединения трансформаторов.

#### 4.1. Определение токов несимметричных КЗ для различных моментов времени по типовым кривым

Для вычисления тока прямой последовательности несимметричного КЗ пользуются типовыми кривыми на основании правила эквивалентности прямой последовательности, которое гласит, что ток

прямой последовательности соответствует току трехфазного КЗ за индуктивным сопротивлением ( $x_{\Delta}^{(n)}$ ) – называемым сопротивлением шунта  $x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)} = x_{\Sigma}^{(n)}$ .

По току прямой последовательности для генерирующих ветвей вычисляют отношения  $I_{1nГ}''/I_{Г,ном}$ , а при необходимости также  $I_{1nГ}''/I_{1n\Sigma}''$  и затем, пользуясь кривыми (рис. 3.8а и 3.8б) находят  $I_{1nГ}''/I_{1nГ}''$  или  $I_{1n\Sigma}''/I_{1n\Sigma}''$ .

По найденным относительным токам прямой последовательности, пользуясь коэффициентами пропорциональности  $m^{(n)}$  и зная токи прямой последовательности для  $t=0$ , определяют полные токи несимметричного КЗ для заданных моментов времени.

Задача 4.1. Определить для начального момента времени ток двухфазного и однофазного КЗ в точке К (рис. 4.1).

Решение.

а) расчет тока при двухфазном КЗ.

1. Составляем схему замещения для прямой последовательности, при этом необходимо учитывать, что нагрузки удалены от точки КЗ и поэтому они не учитываются при составлении схем замещения.

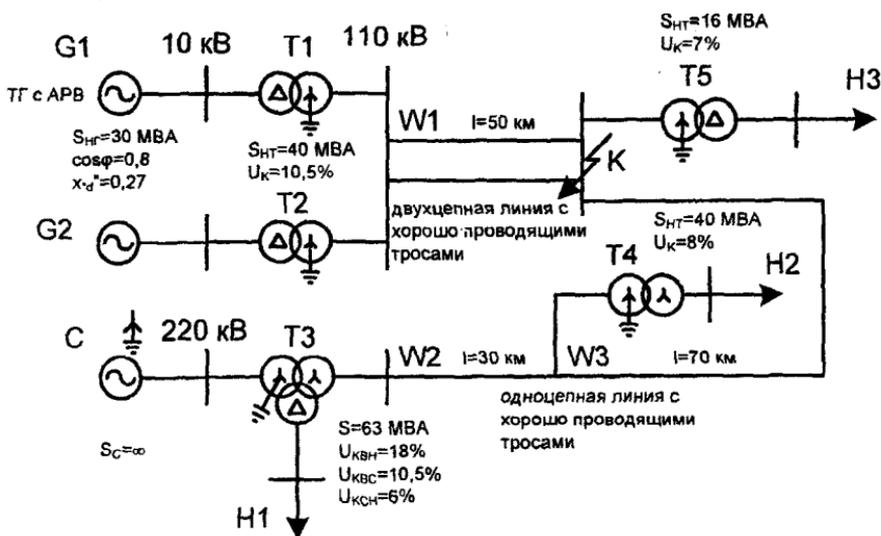


Рис. 4.1 – Исходная расчетная схема

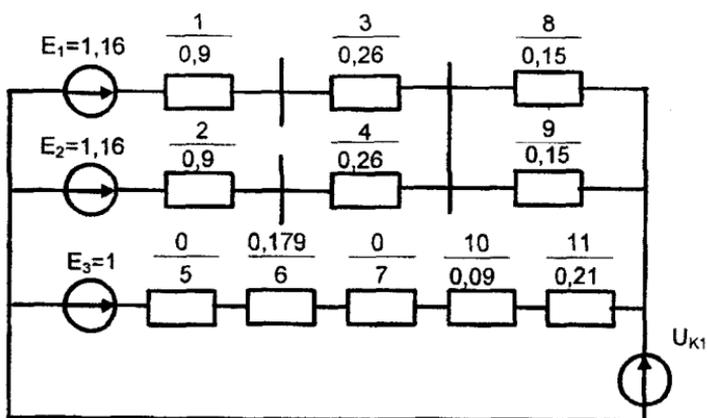


Рис. 4.2 – Схема замещения прямой последовательности  
Аналитическое решение.

1. Задаемся базисными условиями

$$S_6 = 100 \text{ МВА}, \quad U_6 = 115 \text{ кВ},$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}.$$

2. Определяем параметры элементов замещения прямой последовательности

$$G1, G2: \quad x_1 = x_2 = x_{*d}'' \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НГ}}} = 0,27 \cdot \frac{100}{30} = 0,9.$$

$$C: \quad x_5 = 0.$$

$$\text{ЭДС:} \quad E_1'' = E_2'' = U_* + I_* \cdot x_{*d}'' \cdot \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0,27 \cdot 0,6 = 1,16$$

$$E_3'' = 1.$$

$$T1, T2: \quad x_3 = x_4 = \frac{U_{\text{к\%}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{Н}}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 40} = 0,26.$$

T3:

$$x_6 = \frac{U_{KB\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{0,5 \cdot (U_{KBH} + U_{KBC} - U_{KCH})}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot (18 + 10,5 - 6)}{100} \cdot \frac{100}{63} = 0,17,$$

$$x_7 = \frac{U_{KC\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{0,5 \cdot (U_{KBC} + U_{KCH} - U_{KBH})}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot (10,5 + 6 - 18)}{100} \cdot \frac{100}{63} \approx 0.$$

W1:  $x_8 = x_9 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{CPH}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15.$

W2:  $x_{10} = 0,4 \cdot 30 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,09.$

W3:  $x_{11} = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,21.$

3. Преобразуем схему, т.е. определим результирующую ЭДС и результирующее сопротивление

$$x_{12} = \frac{x_1 + x_3}{2} = \frac{0,9 + 0,26}{2} = 0,58,$$

$$x_{13} = \frac{x_8}{2} = \frac{0,15}{2} = 0,075,$$

$$x_{14} = x_{12} + x_{13} = 0,58 + 0,075 = 0,655,$$

$$x_{15} = x_5 + x_6 + x_7 + x_{10} + x_{11} = 0 + 0,179 + 0 + 0,09 + 0,21 = 0,479,$$

$$x_{1\Sigma} = \frac{x_{14} \cdot x_{15}}{x_{14} + x_{15}} = \frac{0,655 \cdot 0,479}{0,655 + 0,479} = 0,277,$$

$$E_\Sigma = \frac{E_1 \cdot x_{15} + E_3 \cdot x_{14}}{x_{14} + x_{15}} = \frac{1,16 \cdot 0,479 + 1 \cdot 0,655}{0,655 + 0,479} = 1,07.$$

4. Составляем схему замещения для обратной последовательности.

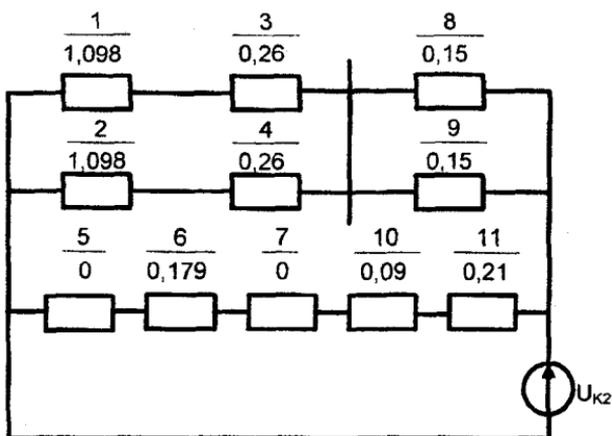


Рис. 4.3 – Схема замещения обратной последовательности

5. Сопротивления обратной последовательности всех элементов схемы, кроме генераторов, равны сопротивлениям прямой последовательности. Для генераторов с демпферными обмотками имеем:

$$x_1 = x_2 = 1,22 \cdot x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{нгр}} = 1,22 \cdot 0,27 \cdot \frac{100}{30} = 1,098$$

После аналогичного преобразования схемы замещения обратной последовательности получим:

$$x_{2\Sigma} = 0,293.$$

6. Ток прямой последовательности в месте КЗ:

$$I_{к1}'' = \frac{E_\Sigma}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma}} = \frac{1,07}{0,277 + 0,293} = 1,877.$$

7. Ток в поврежденных фазах в месте КЗ в именованных единицах:

$$I_k'' = m^{(2)} \cdot I_{к1}'' \cdot I_6 = \sqrt{3} \cdot 1,877 \cdot 0,5 = 1,625 \text{ кА.}$$

Решение с использованием расчетных кривых.

1. В схеме замещения прямой последовательности выделяем две генерирующие ветви: станция с генераторами G1 и G2 и система (рис. 4.4). Сопротивления прямой последовательности ветвей берем из предыдущего расчета.

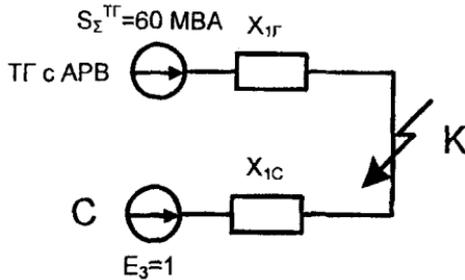
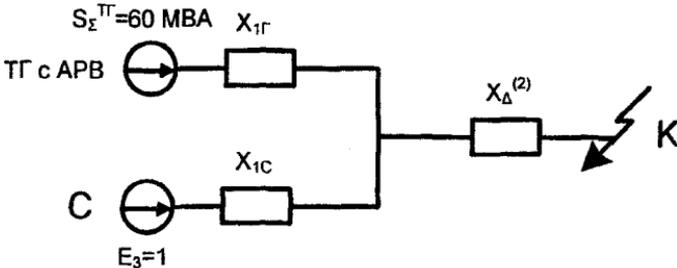


Рис. 4.4 – Схема замещения для расчета с использованием расчетных кривых

2. При расчете по расчетным кривым сопротивление обратной последовательности для генераторов можно принять равным сопротивлению прямой последовательности ( $x_{2Г} = x_{1Г}$ ) [2]. С учетом этого преобразовав схему замещения обратной последовательности будем иметь:

$$x_{2\Sigma} = 0,277.$$

3. Согласно правилу эквивалентности прямой последовательности, в схеме замещения прямой последовательности точку КЗ удалим на величину шунта  $x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma}$ .



4. Используя метод коэффициентов токораспределения перейдем к лучевой схеме и определим расчетную реактивность генерирующих ветвей G1 и G2:

$$x_{\text{расч1}} = \frac{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(2)}}{C_1} \cdot \frac{S_{\Sigma}^{\text{ТГ}}}{S_{\text{нГ}}} = \frac{0,277 + 0,277}{0,422} \cdot \frac{60}{100} = 0,787.$$

Расчетная реактивность ветви системы:

$$x_{\text{расч2}} = \frac{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(2)}}{C_2} = \frac{0,277 + 0,277}{0,578} = 0,958.$$

5. По расчетным кривым для турбогенераторов с АРВ определяем периодическую составляющую тока прямой последовательности от генераторов:

$$I_{\text{пк1}}^{(2)} = 1,37.$$

6. Полный ток в поврежденных фазах в месте КЗ:

$$\begin{aligned} I_{\text{к}}^{(2)} &= m^{(2)} \cdot \left( I_{\text{пк1}}^{(2)} \cdot I_{\text{н}\Sigma} + I_{\text{б}} \cdot \frac{1}{x_{\text{расч}}} \right) = \\ &= \sqrt{3} \cdot \left( 1,37 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot \frac{1}{0,958} \right) = 1,616 \text{ кА} \end{aligned}$$

где

$$I_{\text{н}\Sigma} = \frac{2 \cdot S_{\text{нг}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{б}}} = \frac{2 \cdot 30}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,3 \text{ кА.}$$

б) Расчет тока по однофазном КЗ.

Для расчета тока однофазного КЗ необходимо составить и рассчитать схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Схемы прямой и обратной последовательностей рассчитаны ранее. Схема замещения нулевой последовательности приведена на рис. 4.5.

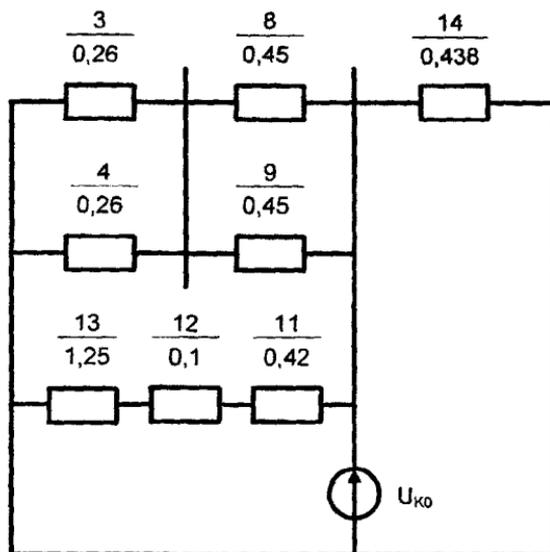


Рис. 4.5 – Схема замещения нулевой последовательности

1. Сопротивления нулевой последовательности элементов схемы в относительных единицах:

$$T1, T2: \quad x_{3(0)} = x_{4(0)} = 0,26,$$

$$T4 \quad x_{12(0)} = 0,5 \cdot \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{0,5 \cdot 8 \cdot 100}{100 \cdot 40} = 0,1,$$

$$x_{13(0)} = x_{\mu 0} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{(0,3 \div 1) \cdot S_6}{S_H} = \frac{0,5 \cdot 100}{40} = 1,25,$$

$$T5 \quad x_{14(0)} = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{7 \cdot 100}{100 \cdot 16} = 0,438,$$

$$W1: \quad x_{8(0)} = x_{9(0)} = 3 \cdot x_{8(1)} = 3 \cdot 0,15 = 0,45,$$

$$W3: \quad x_{11(0)} = 2 \cdot x_{11(1)} = 2 \cdot 0,21 = 0,42.$$

2. Результирующее сопротивление схемы нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} x_{0\Sigma} &= \left( x_{14(0)} \parallel \frac{(x_{3(0)} + x_{8(0)})}{2} \right) \parallel (x_{11} + x_{12} + x_{13}) = \\ &= \left( 0,438 \parallel \frac{(0,26 + 0,45)}{2} \right) \parallel (0,42 + 0,1 + 1,25) = 0,176. \end{aligned}$$

3. Ток прямой последовательности в месте КЗ:

$$I_{к1}^{(1)} = \frac{E_{\Sigma}^*}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = \frac{1,07}{0,277 + 0,293 + 0,176} = 1,43.$$

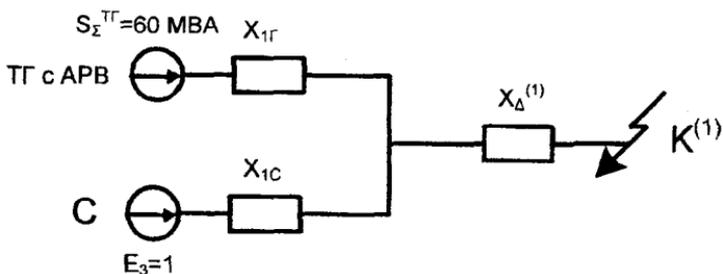
4. Полный ток в месте КЗ:

$$I_{к}^{(1)} = m^{(1)} \cdot I_{к1}^{(1)} \cdot I_{\phi} = 3 \cdot 1,43 \cdot 0,5 = 2,145 \text{ кА.}$$

Расчет с использованием расчетных кривых.

1. Согласно правилу эквивалентности прямой последовательности в схеме прямой последовательности точку КЗ удалим на величину шунта:

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



$$x_{1Г} = 0,655,$$

$$x_{1С} = 0,479,$$

$$x_{\Delta}^{(1)} = 0,277 + 0,176 = 0,453.$$

2. Найдем коэффициенты токораспределения ветвей, характеризующие долю их участия в питании КЗ:

$$C_1 = \frac{(x_{1Г} \parallel x_{1С})}{x_{1Г}} = \frac{0,655 \cdot 0,479}{0,655 + 0,479} \cdot \frac{1}{0,655} = 0,422,$$

$$C_2 = \frac{(x_{1Г} \parallel x_{1С})}{x_{1С}} = \frac{0,655 \cdot 0,479}{0,655 + 0,479} \cdot \frac{1}{0,479} = 0,578,$$

3. Сопротивления ветвей будут:

$$x_{\Sigma} = (x_{1Г} \parallel x_{1С}) + x_{\Delta}^{(1)} = \frac{0,655 \cdot 0,479}{0,655 + 0,479} + 0,453 = 0,73,$$

$$x_{Г} = \frac{x_{\Sigma}}{C_1} = \frac{0,73}{0,422} = 1,73,$$

$$x_{С} = \frac{x_{\Sigma}}{C_2} = \frac{0,73}{0,578} = 1,26.$$

4. Определяем расчетные сопротивления ветвей:

$$\text{ТГ:} \quad x_{\text{расч1}} = x_{Г} \cdot \frac{S_{\Sigma Г}}{S_6} = 1,73 \cdot \frac{60}{100} = 1,038,$$

$$\text{С:} \quad x_{\text{расч2}} = x_{С} = 1,26.$$

5. По расчетным кривым для ТГ с АРВ определяем периодическую составляющую тока прямой последовательности от ветви генераторов:

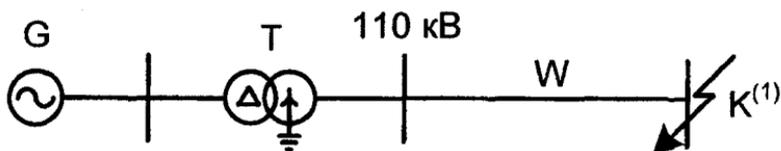
$$I_{\text{пк1}}^{(1)} = 0,72.$$

6. Полный ток в месте КЗ будет:

$$I_K^{(1)} = m^{(1)} \cdot \left( I_{nK1}^{(1)} \cdot I_{n\Sigma} + \frac{1}{x_{расч2}} \cdot I_G \right) =$$

$$= 3 \cdot \left( 0,72 \cdot 0,3 + \frac{1}{1,26} \cdot 0,5 \right) = 1,84 \text{ кА.}$$

Задача 4.2. Определить ударный ток при однофазном КЗ для схемы:

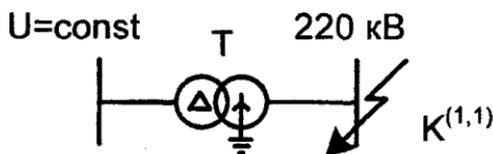


G:  $S_n = 200 \text{ МВА}$ ;  $\cos\phi = 0,8$ ;  $x_d'' = 0,2$ .

T:  $S_n = 160 \text{ МВА}$ ,  $U_k = 10 \%$ .

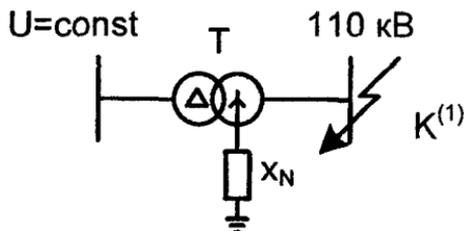
W:  $l = 70 \text{ км}$ .

Задача 4.3. Определить ток, протекающий через нейтраль трансформатора при двухфазном КЗ на землю для схемы:



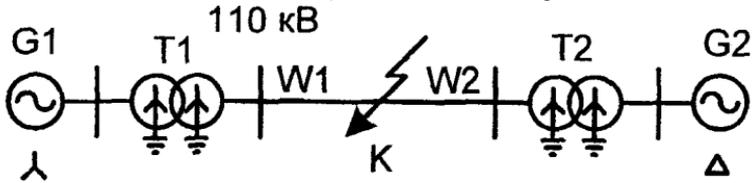
T:  $S_n = 125 \text{ МВА}$ ,  $U_k = 10 \%$ .

Задача 4.4. Определить сопротивление заземления нейтрали трансформатора, чтобы снизить ток однофазного КЗ в 2 раза по отношению к трехфазному.



T:  $S_n = 100 \text{ МВА}$ ,  $U_k = 10 \%$ .

Задача 4.5. Определить результирующее сопротивление нулевой последовательности при поперечной несимметрии для схемы:

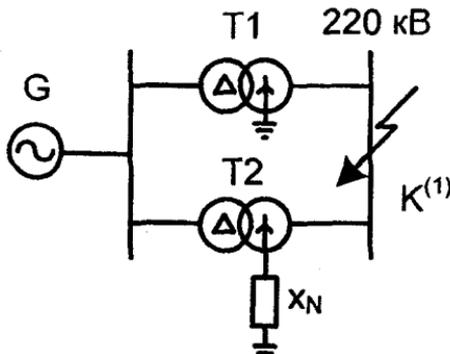


G1, G2:  $S_H = 125 \text{ MVA}$ ;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $x_d'' = 0,12$ .

T1, T2:  $S_H = 125 \text{ MVA}$ ,  $U_K = 10 \%$ .

W:  $l = 50 \text{ км}$ .

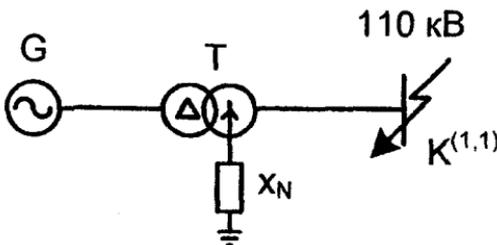
Задача 4.6. Определить ток однофазного КЗ для схемы:



G:  $S_H = 63 \text{ MVA}$ ,  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $x_d'' = 0,18$ .

T1, T2:  $S_H = 80 \text{ MVA}$ ,  $U_K = 9 \%$ ;  $X_N = 10 \text{ Ом}$ .

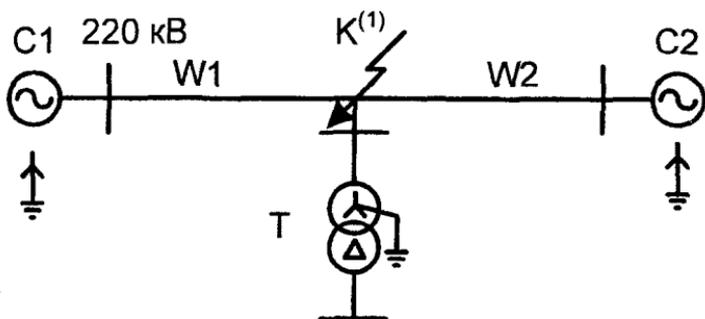
Задача 4.7. Определить ток двухфазного КЗ на землю и ток в нейтрали трансформатора для схемы:



G:  $S_H = 130 \text{ MVA}$ ;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $x_d'' = 0,2$ ;  $x_2 = 0,28$ .

T:  $S_H = 160 \text{ MVA}$ ,  $U_K = 10,5 \%$ ;  $X_N = 15 \text{ Ом}$ .

Задача 4.8. Определить ударный ток однофазного КЗ и напряжения в неповрежденных фазах для схемы:



C1:  $S_1 = 2000$  МВА;  $x_{c1} = 0,7$ ;  $x_{c2} = 0,7$ ;  $x_{c0} = 0,95$ .

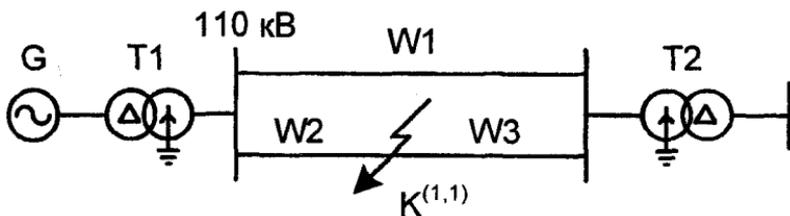
C2:  $S_2 = 1000$  МВА;  $x_{c1} = 0,3$ ;  $x_{c2} = 0,3$ ;  $x_{c0} = 0,65$ .

T:  $S_n = 40$  МВА,  $U_k = 10,5$  %.

W1:  $l = 120$  км;  $x_0 = 2x_1$ .

W2:  $l = 90$  км;  $x_0 = 2x_1$ .

Задача 4.9. По типовым кривым определить сверхпереходный ток двухфазного КЗ на землю для схемы:



G:  $P_n = 200$  МВт;  $\cos\varphi = 0,85$ ;  $x_d'' = 0,138 \approx x_2$ ,  $U_n = 13,8$  кВ.

T1:  $S_n = 250$  МВА,  $U_k = 10,5$  %.

T2:  $S_n = 100$  МВА,  $U_k = 9,7$  %.

W1:  $l = 80$  км;  $x_0 = 3,5x_1$  – без учета влияния соседней цепи;

$x_{0\text{I-II}} = 2x_1$  – реактивность взаимной индукции между цепями в нулевой последовательности;

W2:  $l = 30$  км; W3:  $l = 50$  км.

Задача 4.10. Определить сверхпереходный ток однофазного КЗ для схемы, приведенной ниже.

G1:  $S_n = 117$  МВА;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $x_d'' = 0,2 \approx x_2$ ;

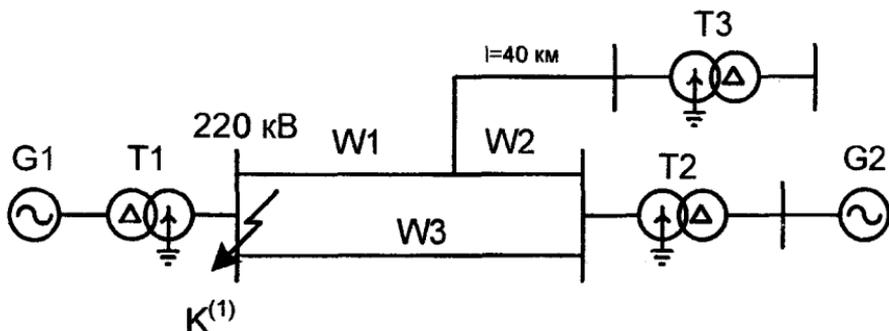
G2:  $S_n = 63$  МВА;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $x_d = 0,15 \approx x_2$ ;

T1:  $S_n = 125$  МВА,  $U_k = 10,5$  %; T2:  $S_n = 80$  МВА,  $U_k = 8,5$  %;

T3:  $S_H = 60$  МВА,  $U_k = 10,5$  %.

W1:  $l = 100$  км; W2:  $l = 40$  км; W3:  $l = 140$  км;

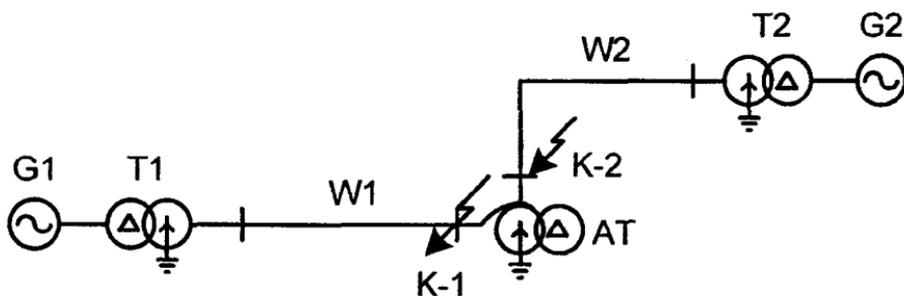
$x_0 = 3,5x_1$  – влияние соседних цепей не учитывать.



Задача 4.11. При однофазном КЗ поочередно в точках К-1 и К-2 схемы определить начальные сверхпереходные токи нулевой последовательности в линиях W1 и W2 и в нейтрали автотрансформатора АТ. Определение произвести для условий, когда у автотрансформатора АТ:

а) имеется третья обмотка;

б) третья обмотка отсутствует (или разомкнута). До КЗ оба генератора работали на холостом ходу с номинальным напряжением.



G1:  $S_H = 117$  МВА;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $x_d'' = 0,133 \approx x_2$ ;  $U_H = 10,5$  кВ

G2:  $S_H = 120$  МВА;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $x_d'' = 0,285 \approx x_2$ ;  $U_H = 6,3$  кВ

T1:  $S_H = 120$  МВА,  $U_k = 12$  %;  $n_T = 230/10,5$ ;

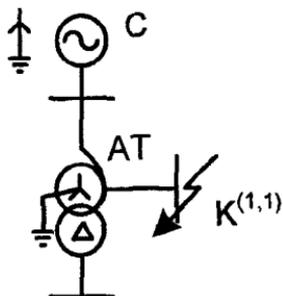
T2:  $S_H = 60$  МВА,  $U_k = 5,2$  %;  $n_T = 115/6,3$ ;

АТ:  $S_H = 80$  МВА,  $U_{квс} = 8$  %;  $U_{квн} = 30$  %;  $U_{кчн} = 20$  %;

$n_T = 230/115/6,3$ ;

W1:  $l = 100$  км;  $x_0 = 2x_1$ ; W2:  $l = 62$  км;  $x_0 = 3x_1$ .

Задача 4.12. Определить сверхпереходный ток двухфазного КЗ на землю и напряжение в неповрежденной фазе для схемы:

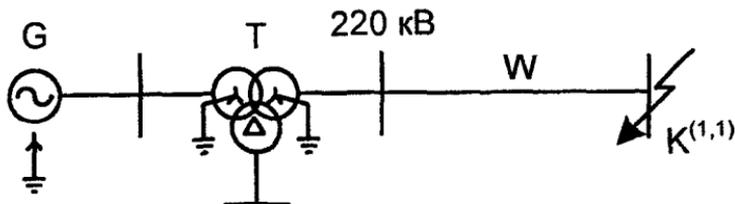


C:  $S = \infty$ ;

AT:  $S_n = 125$  МВА,  $U_{квс} = 10,5$  %;  $U_{квн} = 36,3$  %;  $U_{кск} = 23$  %;

$n_\tau = 230/115/10,5$ ;

Задача 4.13. Определить ток нулевой последовательности при двухфазном КЗ на землю для схемы:

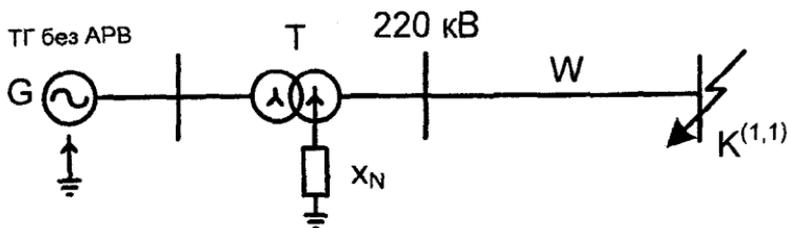


G:  $S_n = 63$  МВА;  $x_d'' = 0,18$ ;  $\cos\varphi = 0,8$ ;

T:  $S_n = 63$  МВА,  $U_{квс} = 10,5$  %;  $U_{квн} = 18$  %;  $U_{кск} = 6$  %;

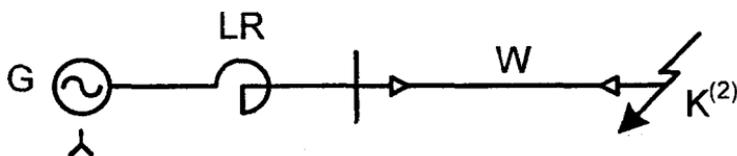
W:  $l = 120$  км;  $x_0 = 2x_1$ .

Задача 4.14. Определить установившийся ток при двухфазном КЗ на землю.



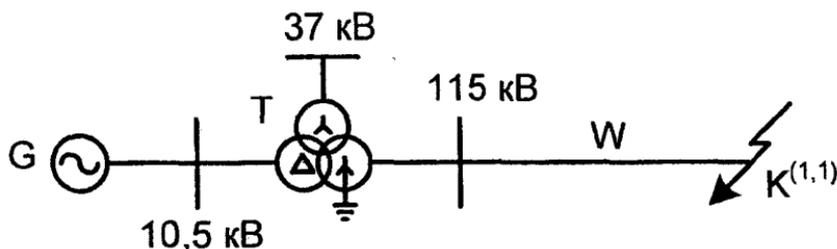
G:  $P_n = 80$  МВт;  $x_d'' = 0,18$ ;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $K_c = 0,65$ ;  $I_{*n} = 0,7$ ;  
 T:  $S_n = 125$  МВА,  $U_k = 10,5$  %.  
 W:  $l = 100$  км;  $x_0 = 3x_1$ ;  $X_{*N} = 0,9$ .

Задача 4.15. Определить установившийся ток при двухфазном КЗ для схемы:



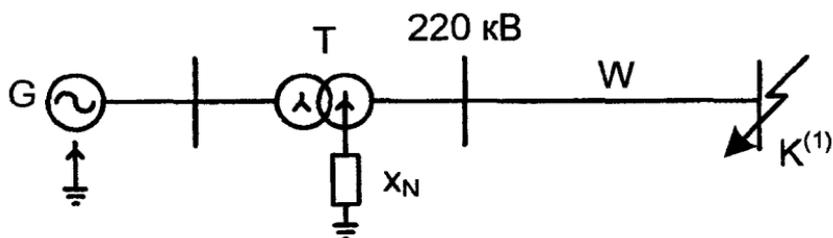
G: ТГ с АРВ;  $P_n = 60$  МВт;  $x_d'' = 0,15$ ;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $K_c = 0,8$ ;  $I_{*нпр} = 3,2$ ;  
 W:  $l = 6$  км; LR:  $U_n = 10$  кВ;  $x_p = 0,24$  Ом;  $I_n = 1000$  А.

Задача 4.16. Определить напряжение прямой последовательности для двухфазного КЗ на землю в схеме:



G:  $P_n = 120$  МВт;  $x_d'' = 0,2$ ;  $\cos\varphi = 0,85$ ;  $x_2 = 0,22$ ;  $x_0 = 0,05$ ;  $I_n = 0,9$ ;  
 T:  $S_n = 160$  МВА,  $U_{квс} = 11$  %;  $U_{квн} = 32$  %;  $U_{кскн} = 20$  %;  
 W:  $l = 90$  км;  $x_0 = 2x_1$ .

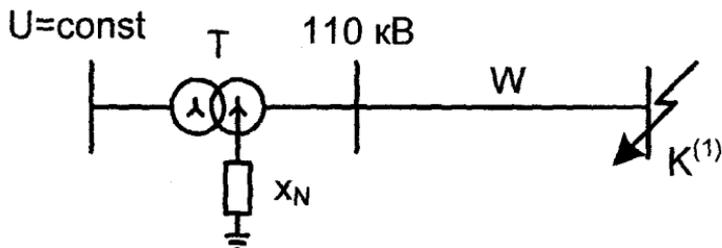
Задача 4.17. По расчетным кривым определить ударный ток однофазного КЗ и ток в нейтрали трансформатора для схемы:



G: ГГ с АРВ;  $P_n = 160$  МВт;  $x_d'' = 0,25$ ;  $\cos\varphi = 0,85$ ;  $x_2 = x_1$ ;  $x_0 = 0,08$ ;  
 T:  $S_n = 200$  МВА,  $U_k = 10$  %;  $X_N = 4$  Ом..

W:  $l = 120$  км;  $x_0 = 3x_1$ .

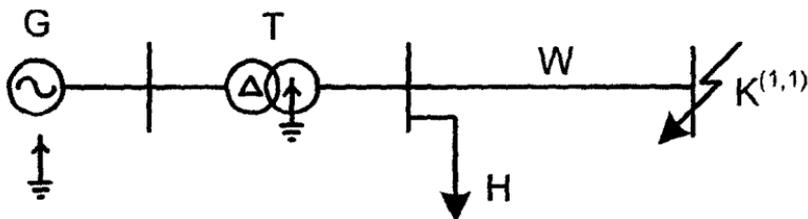
Задача 4.18. Определить ударный ток однофазного КЗ.



T:  $S_n = 125$  МВА,  $U_k = 10,5\%$ ;  $X_{*N} = 0,5$ ;

W:  $l = 80$  км;  $x_0 = 2x_1$ .

Задача 4.19. Определить по расчетным кривым установившийся ток при двухфазном КЗ на землю.



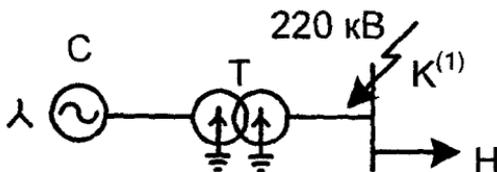
G: ГГ с АРВ;  $P_n = 100$  МВт;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $x_{*d}'' = 0,18$ ;

T:  $S_n = 125$  МВА,  $U_k = 10\%$ .

H:  $S_n = 20$  МВА;

W:  $l = 80$  км;  $x_0 = 2,5x_1$ .

Задача 4.20. Определить ударный ток в месте однофазного КЗ для схемы:

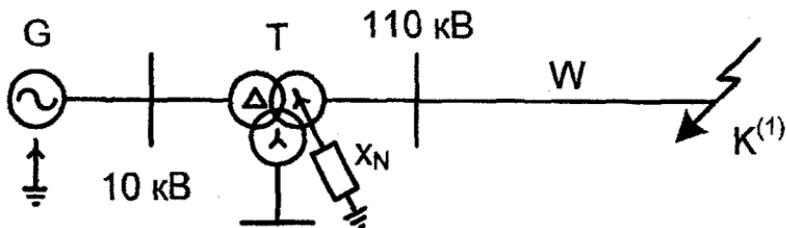


C:  $S_{кз} = 2000$  МВА;

T:  $S_n = 160$  МВА,  $U_k = 10,5\%$ .

H:  $S_n = 40$  МВА.

Задача 4.21. Определить ток установившегося режима, протекающий через нейтраль трансформатора при однофазном КЗ.



G:  $P_n = 63$  МВт;  $x_d'' = 0,18$ ;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $K_c = 0,8$ ;  $I_{*n} = 0,9$ ;  
 T:  $S_n = 80$  МВА,  $U_{квс} = 7\%$ ;  $U_{квн} = 18,5\%$ ;  $U_{кчн} = 11\%$ ;  $X_{*N} = 0,7$ .

## Литература

1. Методы расчета токов короткого замыкания: сборник задач / Н.Н. Волков [и др.]. – М.: МЭИ, 2000. – 56 с.
2. Крючков, И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие для вузов / И.П. Крючков. – М.: МЭИ, 2000.
3. Крючков, И.П. Практические методы расчета токов короткого замыкания / И.П. Крючков. – М.: МЭИ, 1993.
4. Будницкий, А.Б. Токи короткого замыкания / А.Б. Будницкий, М.Л. Колниболотский. – Киев: Гос. изд-во техн. лит-ры УССР, 1960.
5. Ульянов, С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1968.
6. Евминов, Л.И. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие для студентов специальности «Электроэнергетика» высших учебных заведений / Л.И. Евминов. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2003. – 301 с.
7. Беляева, Е.Н. Как рассчитать ток короткого замыкания / Е.Н. Беляева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 130 с.

Учебное издание

## СБОРНИК ЗАДАЧ

по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы»  
и «Переходные процессы в электроэнергетических системах»  
для студентов специальностей

1-43 01 01 «Электрические станции»,

1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,

1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-53 01 04 «Автоматизация  
и управление энергетическими процессами»  
специализации 1-53 01 04 03 «Автоматизация  
и релейная защита электроустановок»

С о с т а в и т е л и:

СИЛЮК Степан Макарович

БУЛАТ Валерий Александрович

БУЛОЙЧИК Елена Васильевна

---

Подписано в печать 26.04.2010.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 4,19. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 100. Заказ 1210.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.