

## Пример расчета токов короткого замыкания

При трехфазном коротком замыкании на шинах 220 кВ ГЭС (рис.3.1) (точка К1) определить значение периодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени, значение апериодической составляющей тока короткого замыкания в момент времени  $t=0,06$  с и ударный ток короткого замыкания.

Для решения задачи используется расчетная схема (рис.3.1). Параметры различных элементов этой схемы приведены ниже: генераторы G1...G8:

$$P_{ном} = 40 \text{ МВт}, U_{ном} = 10,5 \text{ кВ}, \cos \varphi_{ном} = 0,80, X''_{*d(ном)} = 0,23, x_{*2(ном)} = 0,23$$

$$T_a = 0,34 \text{ с} \cdot P_{(0)}/P_{ном} = 1$$

Параметры воздушной сети ВЛ:

$$\text{Система 1: } S_{ном} = 3500 \text{ МВА}, P_{ав.р} = 220 \text{ МВт}, X_c = 1,3 \text{ о.е.};$$

$$\text{Система 2: } S_{ном} = 2500 \text{ МВА}, P_{ав.р} = 130 \text{ МВт}, X_c = 1,0 \text{ о.е.}$$

Длина воздушных линий :

$$l_1 = 200 \text{ км}, l_2 = 220 \text{ км}, l_3 = 250 \text{ км}.$$

$$X_{уд} = 0,429 \text{ Ом/км}; R_{уд} = 0,098 \text{ Ом/км}$$

Трансформаторы Т1-Т4:

$$S_{ном} = 80 \text{ МВА}, n = 230/10,5 \text{ кВ}, u_k = 11 \%, \Delta p_k = 315 \text{ кВт}.$$

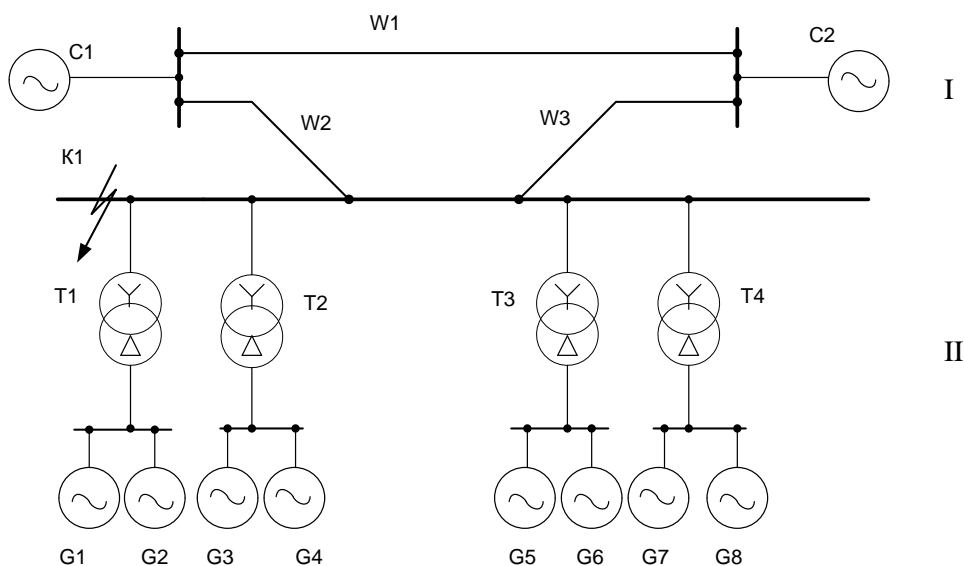


рис.3.1

Решение. В качестве базисных единиц выбираем  $S_{\delta}=1000 \text{ МВ А}$ ;

$U_{\delta}=U_{\text{ср ном}}$ , т.е  $U_{\delta I}=230 \text{ кВ}$  и  $U_{\delta II}=10,5 \text{ кВ}$ , где цифрами I и II

(в индексах) обозначаем соответственно ступени высшего и генераторного

напряжений;  $I_{\delta I} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta I}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 2,51 \text{ кА}$

Эквивалентная схема замещения для расчета  $I_{\text{по}}$  представлена на рис. 3.2

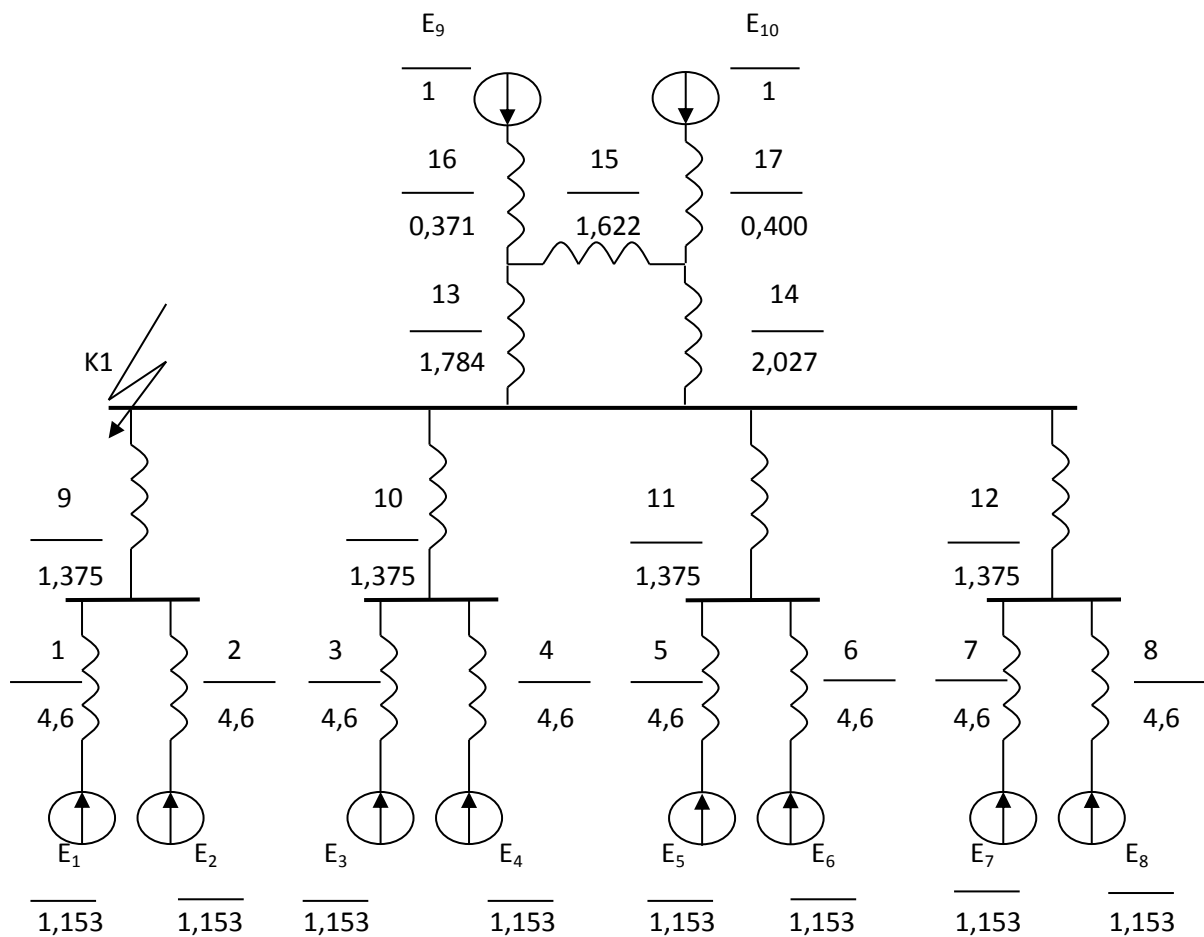


рис.3.2 Эквивалентная схема замещения

$$x_{*1(B)} = x_{*2(B)} = x_{*3(B)} = x_{*4(B)} = x_{*5(B)} = x_{*6(B)} = x_{*7(B)} = x_{*8(B)} = X_{*d(HOM)} \cdot \frac{S_B}{P_{HOM} / \cos \varphi_{HOM}} = 0,23 \cdot \frac{1000}{40/0,8} = 4,6$$

$$x_{*9(B)} = x_{*10(B)} = x_{*11(B)} = x_{*12(B)} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{HOM}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{80} = 1,375$$

$$x_{*13(B)} = x_{y\varnothing} \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2} = 0,429 \cdot 220 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1,784$$

$$x_{*14(B)} = x_{y\varnothing} \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2} = 0,429 \cdot 250 \cdot \frac{1000}{230^2} = 2,027$$

$$x_{*15(B)} = x_{y\varnothing} \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2} = 0,429 \cdot 200 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1,622$$

$$x_{*16(B)} = x_{*c(HOM)} \cdot \frac{S_B}{S_{HOM}} = 1,3 \cdot \frac{1000}{3500} = 0,371$$

$$x_{*17(B)} = x_{*c(HOM)} \cdot \frac{S_B}{S_{HOM}} = 1 \cdot \frac{1000}{2500} = 0,400$$

$$E_{*9(B)} = E_{*10(B)} = \frac{U_{CP(HOM)}}{U_{BI}} = \frac{230}{230} = 1$$

$$E_{*1(B)} = E_{*2(B)} = E_{*3(B)} = E_{*4(B)} = E_{*5(B)} = E_{*6(B)} = E_{*7(B)} = E_{*8(B)} = \sqrt{(1 + 1 \cdot 0,23 \cdot 0,6)^2 + (1 \cdot 0,23 \cdot 0,8)^2} = 1,153$$

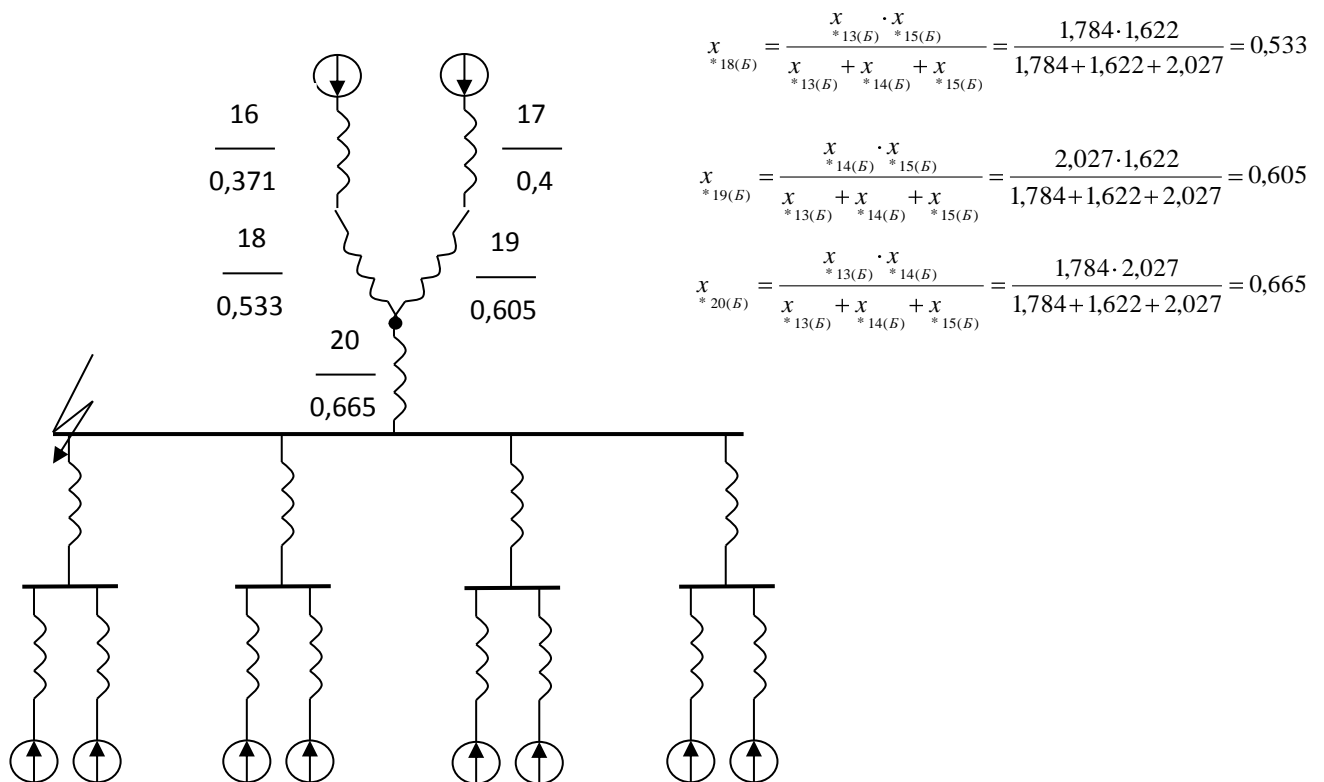


Рис. 3.3 преобразование треугольника в звезду.

$$x_{*21(B)} = \frac{1}{\frac{1}{(x_{*17(B)} + x_{*19(B)})} + \frac{1}{(x_{*16(B)} + x_{*18(B)})}} + x_{*20(B)} = \frac{1}{\frac{1}{(0,4 + 0,605)} + \frac{1}{(0,371 + 0,533)}} + 0,665 = 1,141$$

$$E_{*11(B)} = \frac{\frac{E_{*9(B)}}{(x_{*16(B)} + x_{*18(B)})} + \frac{E_{*10(B)}}{(x_{*17(B)} + x_{*19(B)})}}{\frac{1}{(x_{*17(B)} + x_{*19(B)})} + \frac{1}{(x_{*16(B)} + x_{*18(B)})}} = \frac{\frac{1}{(0,4 + 0,605)} + \frac{1}{(0,371 + 0,533)}}{\frac{1}{(0,4 + 0,605)} + \frac{1}{(0,371 + 0,533)}} = 1$$

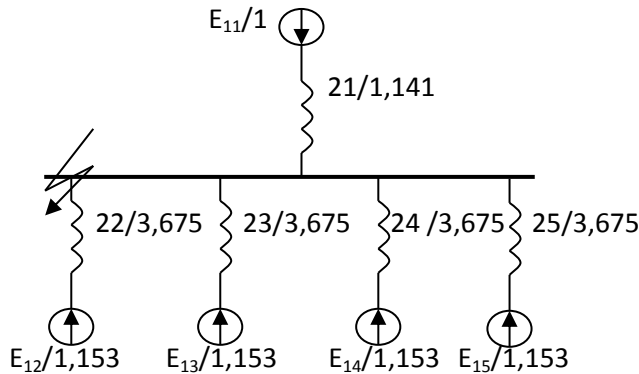


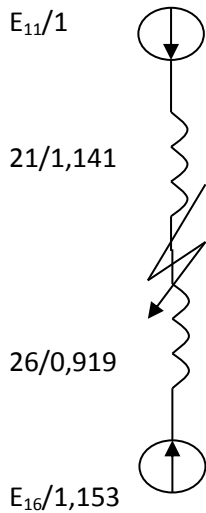
Рис. 3.4 дальнейшее преобразование

$$x_{*22(B)} = \frac{1}{\frac{1}{x_{*1(B)}} + \frac{1}{x_{*2(B)}}} + x_{*9(B)} = \frac{1}{\frac{1}{4,6} + \frac{1}{4,6}} + 1,375 = 3,675$$

$$x_{*22(B)} = x_{*23(B)} = x_{*24(B)} = x_{*25(B)}$$

$$E_{*12(B)} = \frac{\frac{E_{*1(B)}}{x_{*1(B)}} + \frac{E_{*2(B)}}{x_{*2(B)}}}{\frac{1}{x_{*1(B)}} + \frac{1}{x_{*2(B)}}} = \frac{\frac{1,153}{4,6} + \frac{1,153}{4,6}}{\frac{1}{4,6} + \frac{1}{4,6}} = 1,153$$

$$E_{*12(B)} = E_{*13(B)} = E_{*14(B)} = E_{*15(B)}$$



$$E_{*16(B)} = \frac{\frac{E_{*12(B)}}{x_{*21(B)}} + \frac{E_{*13(B)}}{x_{*23(B)}} + \frac{E_{*14(B)}}{x_{*24(B)}} + \frac{E_{*15(B)}}{x_{*25(B)}}}{\frac{1}{x_{*21(B)}} + \frac{1}{x_{*23(B)}} + \frac{1}{x_{*24(B)}} + \frac{1}{x_{*25(B)}}} = \frac{\frac{1,153}{3,675} + \frac{1,153}{3,675} + \frac{1,153}{3,675} + \frac{1,153}{3,675}}{\frac{1}{3,675} + \frac{1}{3,675} + \frac{1}{3,675} + \frac{1}{3,675}} = 1,153$$

$$x_{*26(B)} = \frac{1}{\frac{1}{x_{*21(B)}} + \frac{1}{x_{*23(B)}} + \frac{1}{x_{*24(B)}} + \frac{1}{x_{*25(B)}}} = \frac{1}{\frac{1}{3,675} + \frac{1}{3,675} + \frac{1}{3,675} + \frac{1}{3,675}} = 0,919$$

Рис. 3.5 Преобразованная (относительно точки КЗ) схема замещения

начальные значения периодической составляющей тока КЗ составляют:

$$I_{16} = \frac{E_{*13(B)}}{x_{*26(B)}} \cdot I_{\delta I} = \frac{1,153}{0,919} \cdot 2,51 \approx 3,149 \text{ кА}$$

$$I_{11} = \frac{E_{*c(B)}}{x_{*21(B)}} \cdot I_{\delta I} = \frac{1}{1,141} \cdot 2,51 \approx 2,2 \text{ кА}$$

$$I_{\text{по}} = I_{16} + I_{11} = 3,149 + 2,2 = 5,349 \text{ кА}$$

Точка КЗ К1 делит схему на две независимые части. Поэтому для определения апериодической составляющей тока КЗ и ударного тока необходимо вычислить две эквивалентные постоянные времени затухания апериодических составляющих тока КЗ.

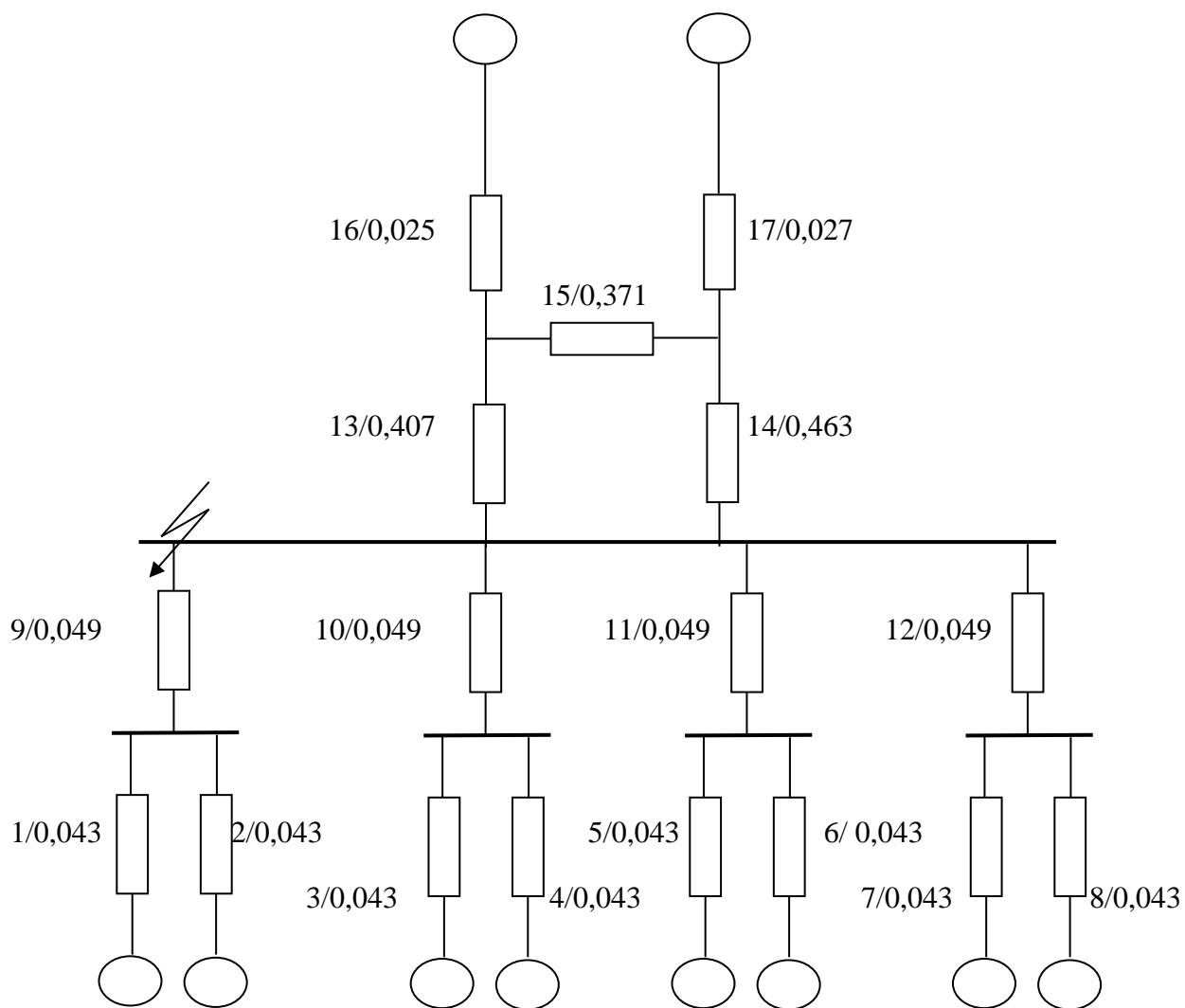


Рис. 3.6 схема замещения (активные сопротивления)

$$x_{*1(B)}' = x_{*2(HOM)} \cdot \frac{S_E}{S_{HOM}} = 0,23 \cdot \frac{1000}{40/0,8} = 4,6$$

$$R_{*1(B)} = \frac{x_{*1(B)}}{\omega \cdot T_a} = \frac{4,6}{314 \cdot 0,34} = 0,043$$

$$R_{*1(B)} = R_{*2(B)} = R_{*3(B)} = R_{*4(B)} = R_{*5(B)} = R_{*6(B)} = R_{*7(B)} = R_{*8(B)}$$

$$R_{*9(B)} = \frac{\Delta P_K \cdot 10^{-3}}{S_{HOM}} \cdot \frac{S_E}{S_{HOM}} = \frac{315 \cdot 10^{-3}}{80} \cdot \frac{1000}{80} = 0,049$$

$$R_{*9(B)} = R_{*10(B)} = R_{*11(B)} = R_{*12(B)}$$

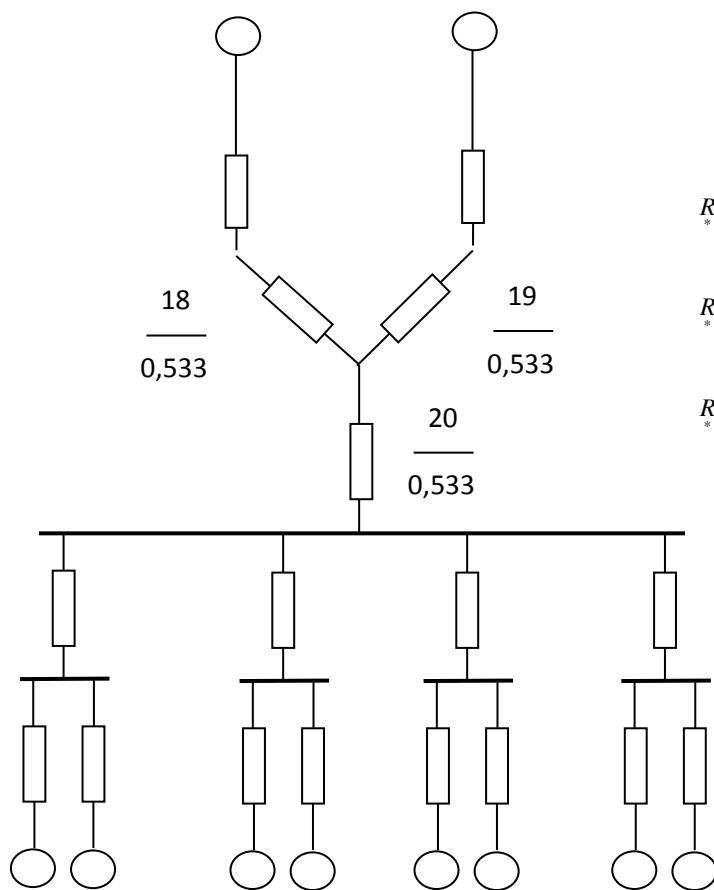
$$R_{*13(B)} = R_{\gamma\delta} \cdot l \cdot \frac{S_E}{U_{EI}^2} = 0,098 \cdot 220 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,407$$

$$R_{*14(B)} = R_{\gamma\delta} \cdot l \cdot \frac{S_E}{U_{EI}^2} = 0,098 \cdot 250 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,463$$

$$R_{*15(B)} = R_{\gamma\delta} \cdot l \cdot \frac{S_E}{U_{EI}^2} = 0,098 \cdot 200 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,371$$

$$R_{*16(B)} = \frac{x_{*16(B)}}{15} = \frac{0,371}{15} = 0,025$$

$$R_{*17(B)} = \frac{x_{*17(B)}}{15} = \frac{0,4}{15} = 0,027$$



$$R_{*18(B)} = \frac{R_{*13(B)} \cdot R_{*15(B)}}{R_{*13(B)} + R_{*14(B)} + R_{*15(B)}} = \frac{0,407 \cdot 0,371}{0,407 + 0,463 + 0,371} = 0,122$$

$$R_{*19(B)} = \frac{R_{*14(B)} \cdot R_{*15(B)}}{R_{*13(B)} + R_{*14(B)} + R_{*15(B)}} = \frac{0,463 \cdot 0,371}{0,407 + 0,463 + 0,371} = 0,138$$

$$R_{*20(B)} = \frac{R_{*13(B)} \cdot R_{*14(B)}}{R_{*13(B)} + R_{*14(B)} + R_{*15(B)}} = \frac{0,407 \cdot 0,463}{0,407 + 0,463 + 0,371} = 0,152$$

Рис. 3.7 преобразование треугольника в звезду.

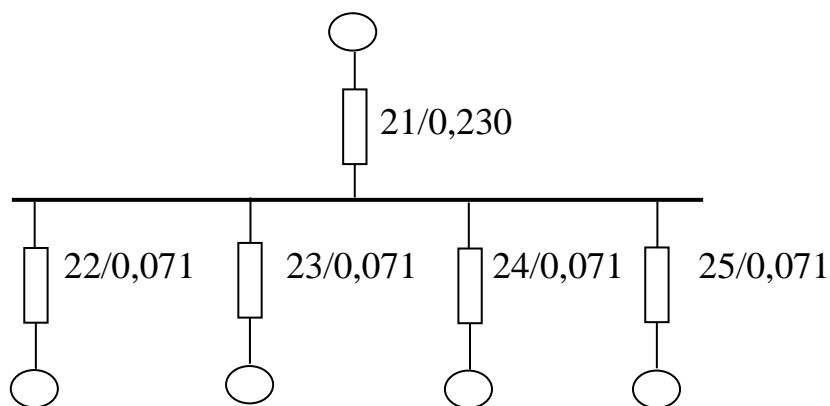


Рис. 3.8 дальнейшее преобразование

$$R_{*21(B)} = \frac{1}{\frac{1}{(R_{*17(B)} + R_{*19(B)})} + \frac{1}{(R_{*16(B)} + R_{*18(B)})}} + R_{*20(B)} = \frac{1}{\frac{1}{(0,027 + 0,138)} + \frac{1}{(0,025 + 0,122)}} + 0,152 = 0,230$$

$$R_{*22(B)} = \frac{1}{\frac{1}{R_{*1(B)}} + \frac{1}{R_{*2(B)}}} + R_{*9(B)} = \frac{1}{\frac{1}{0,043} + \frac{1}{0,043}} + 0,049 = 0,071$$

$$R_{*22(B)} = R_{*23(B)} = R_{*24(B)} = R_{*25(B)}$$

$$R_{*26(B)} = \frac{1}{\frac{1}{R_{*22(B)}} + \frac{1}{R_{*23(B)}} + \frac{1}{R_{*24(B)}} + \frac{1}{R_{*25(B)}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,071} + \frac{1}{0,071} + \frac{1}{0,071} + \frac{1}{0,071}} = 0,018$$

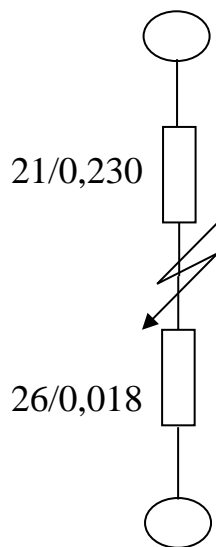


Рис. 3.7 Преобразованная (относительно точки КЗ)

схема замещения.



$$T_{a11} = \frac{x_{*21(B)}}{\omega \cdot R_{*21(B)}} = \frac{1,141}{314 \cdot 0,230} = 0,158c$$

$$T_{a16} = \frac{x_{*26(B)}}{\omega \cdot R_{*26(B)}} = \frac{0,919}{314 \cdot 0,018} = 0,163c$$

$$k_{y\varnothing11} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a11}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,158}} = 1,9387$$

$$k_{y\varnothing16} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a16}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,163}} = 1,9405$$

$$i_{y\varnothing} = \sqrt{2}(I_{11} \cdot k_{y\varnothing11} + I_{16} \cdot k_{y\varnothing16}) = \sqrt{2}(2,2 \cdot 1,9387 + 3,149 \cdot 1,9405) \approx 14,674 \kappa A$$

Определяем апериодическую составляющую  $I_{K3}$  в момент  $t=0,06c$  :

$$i_a = \sqrt{2}(I_{11} \cdot e^{-\frac{0,06}{T_{aC}}} + I_{16} \cdot e^{-\frac{0,06}{T_{aG}}}) = \sqrt{2}(2,2 \cdot e^{-\frac{0,06}{0,158}} + 3,149 \cdot e^{-\frac{0,06}{0,163}}) \approx 5,21 \kappa A$$

### Список использованных источников

1. Крючков И.П. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: Учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2000. 168с., ил.
2. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций; Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 608 с. ил.
3. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
4. Лисовский Г. С., Уманский Б. З., Успенский Б. С., Хейфиц М. Э. Электрическая часть гидроэлектростанций. М. : Энергия, 1965. 368 с., ил.
5. Околович М.Н. Проектирование электрических станций; Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с., ил.