

Пример расчета тока короткого замыкания в главной схеме ГЭС

При трехфазном коротком замыкании на шинах 220 кВ ГЭС определить значение **периодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени**, значение **апериодической составляющей тока короткого замыкания в момент времени $t=0,06\text{с}$** и **ударный ток короткого замыкания**. Расчет выполнить в относительных единицах методом приближенного приведения.

Расчетная схема приведена на рисунке 1. Параметры элементов расчетной схемы:

генераторы G1...G8: $P_{ном} = 40 \text{ МВт}$, $U_{ном} = 10,5 \text{ кВ}$, $\cos \varphi_{ном} = 0,80$,

$$X_{*d(ном)}'' = 0,23, \quad x_{*2(ном)} = 0,23, \quad T_a = 0,34 \text{ с} \quad . \quad P_{(0)}/P_{ном} = 1.$$

Параметры воздушной сети ВН:

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

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

Длина воздушных линий:

$$l_1 = 200 \text{ км}, \quad l_2 = 220 \text{ км}, \quad l_3 = 250 \text{ км}, \quad X_{уд} = 0,429 \text{ Ом/км}; \quad R_{уд} = 0,098 \text{ Ом/км}$$

Трансформаторы Т1-Т4:

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

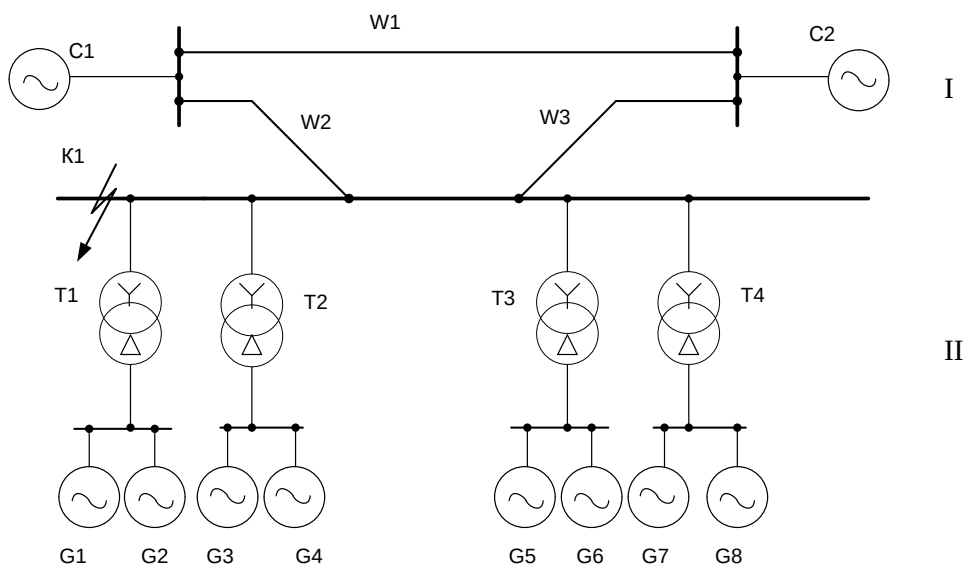


Рисунок 1 - Расчетная схема

Решение.

Выбираем базисные условия (I, II – ступени напряжения расчетной схемы):

$$S_6=1000 \text{ МВА}, U_{6I}=230 \text{ кВ}, U_{6II}=10,5 \text{ кВ}, I_{6I}=\frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6I}}=\frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230}=2,51 \text{ кА}$$

Эквивалентная схема замещения для расчета периодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени $I_{по}$ представлена на рисунке 2.

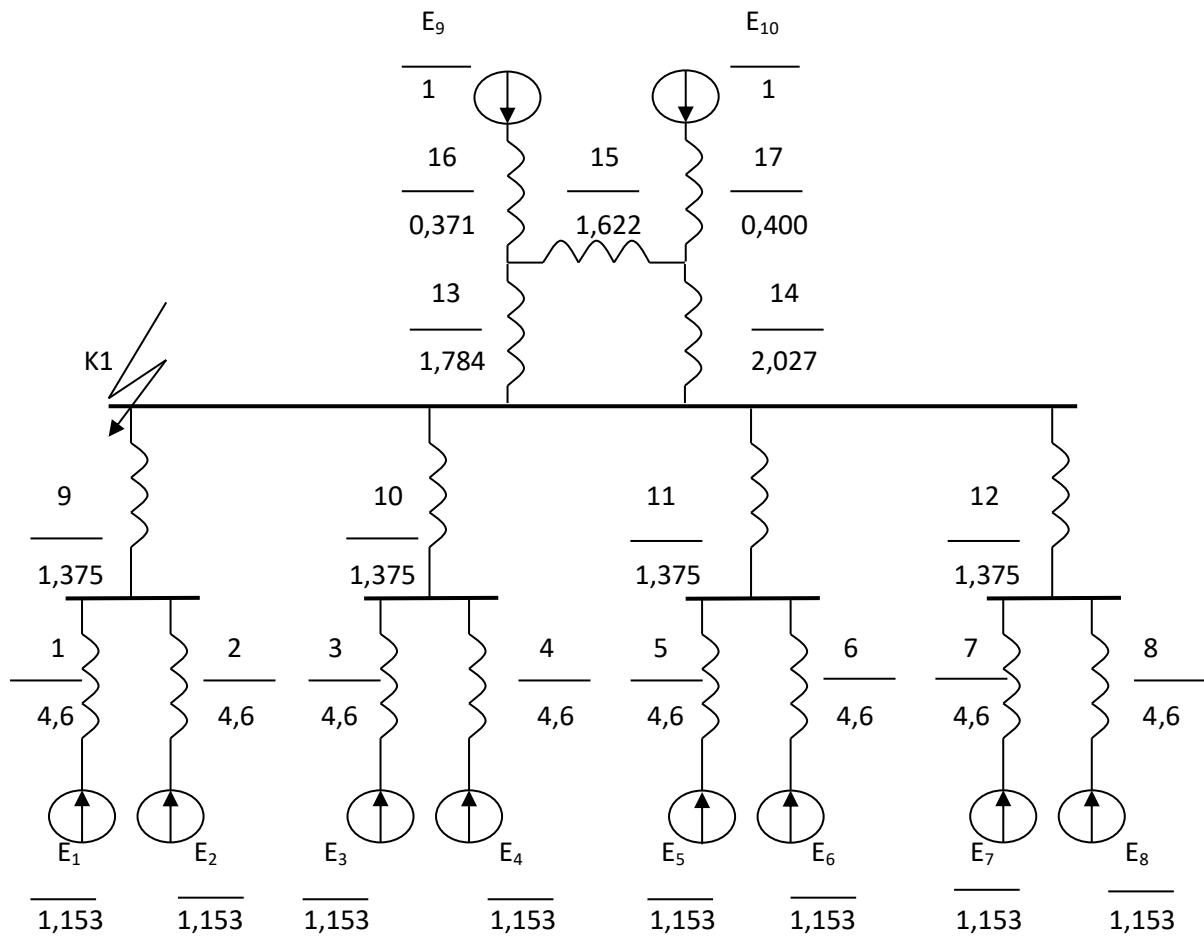


Рисунок 2 - Эквивалентная схема замещения

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

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

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

$$X_{*14(B)} = X_{y\partial} \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2} = 0.429 \cdot 250 \cdot \frac{1000}{230^2} = 2,027$$

$$X_{*15(B)} = X_{y\partial} \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2} = 0.429 \cdot 200 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1,622$$

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

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

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

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

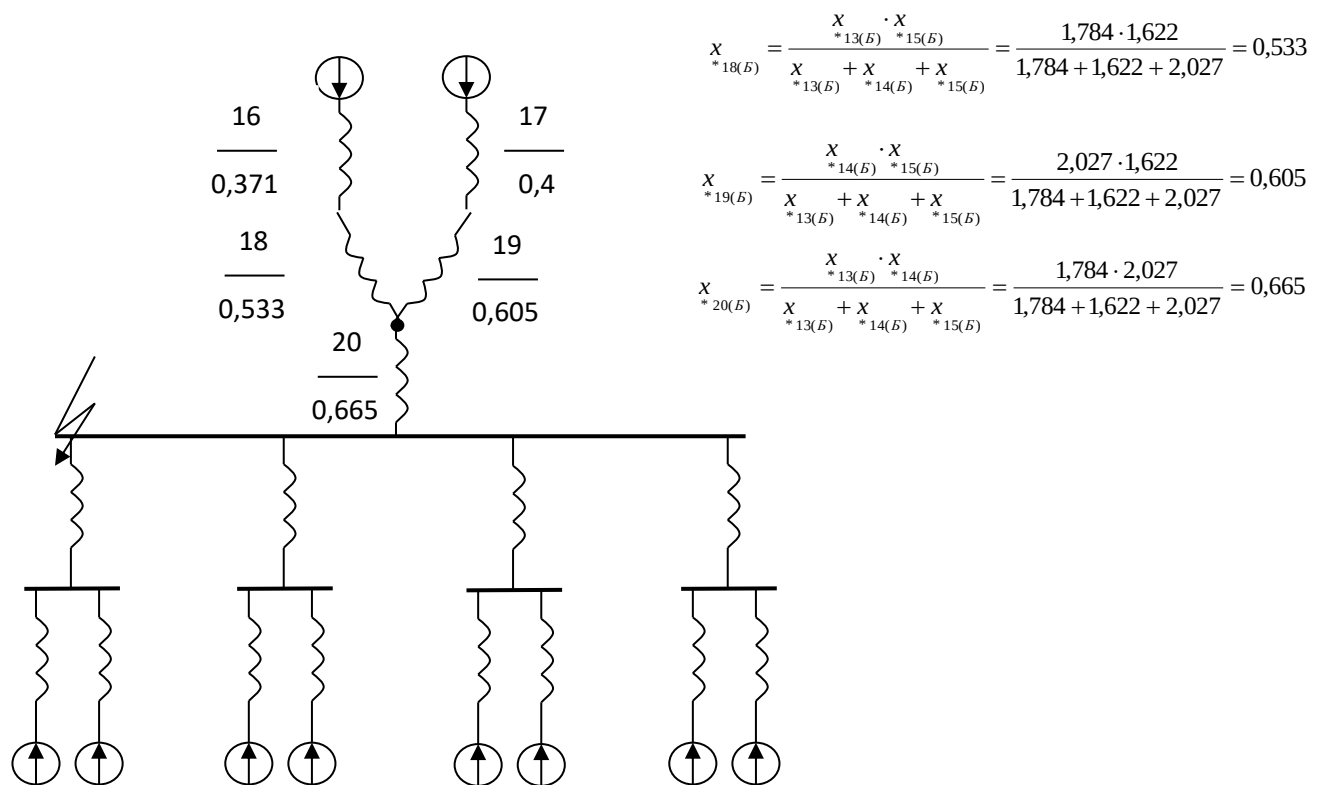


Рисунок 3 – Преобразование треугольника в звезду

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

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

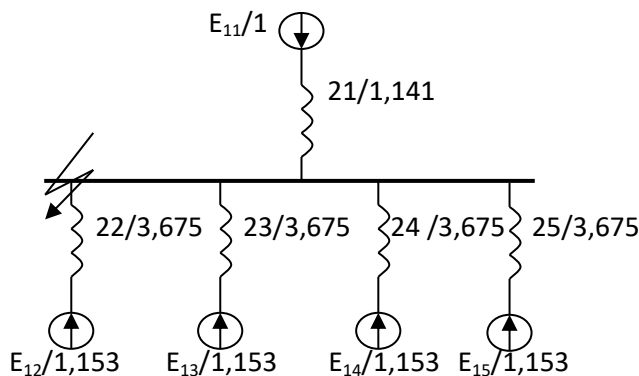


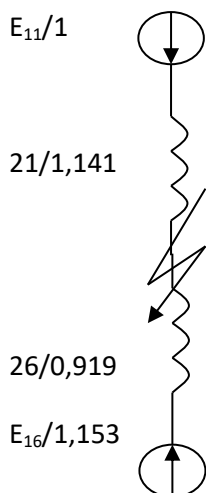
Рисунок 4 - Дальнейшее эквивалентирование

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

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

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

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



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

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

Рисунок 5

Начальные значения периодической составляющей тока КЗ со стороны системы и энергоблоков составляют:

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

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

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

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.

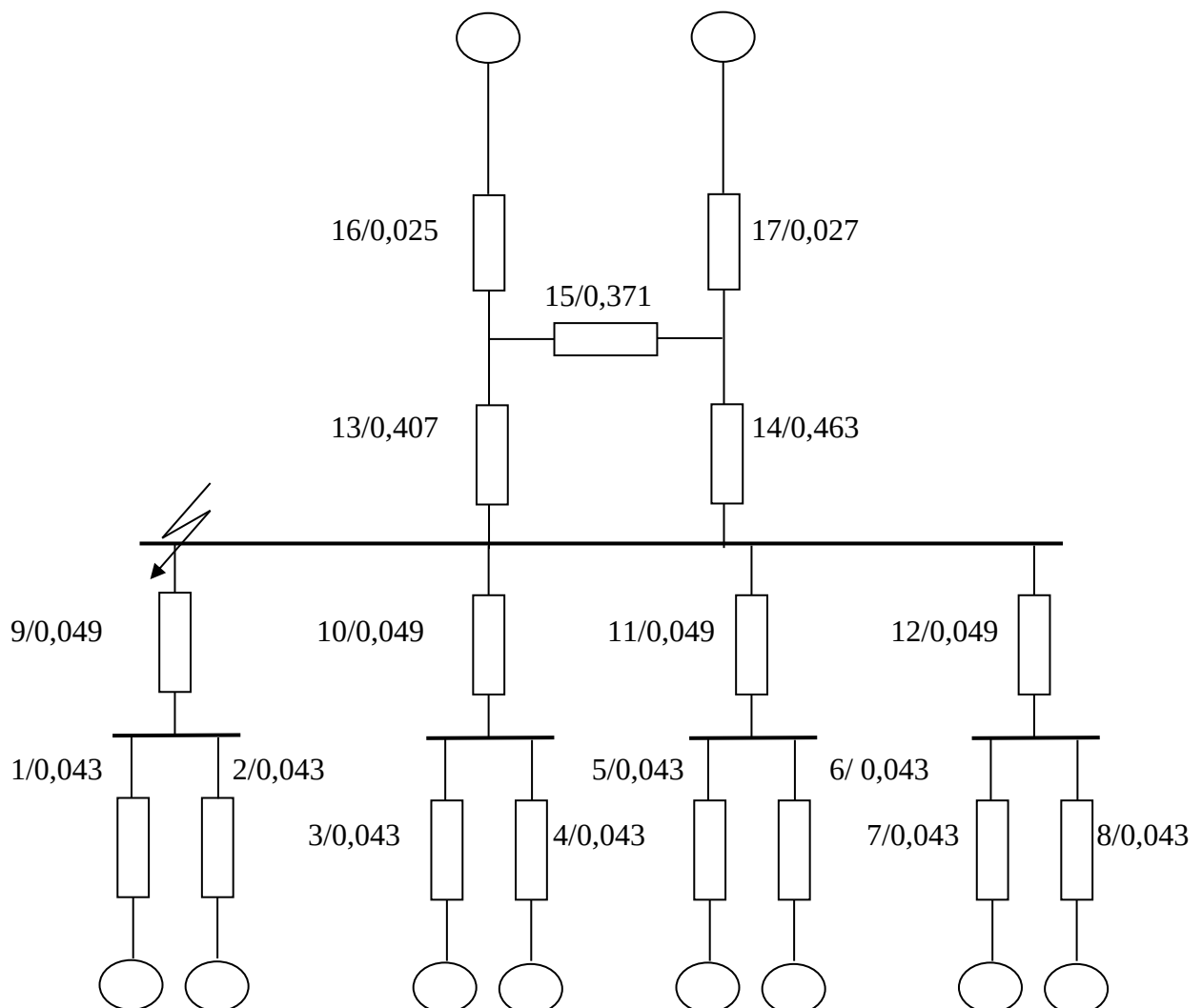


Рисунок 6 - схема замещения с активными сопротивлениями

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

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

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

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

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

$$R_{*13(B)} = R_{y\partial} \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2} = 0,098 \cdot 220 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,407$$

$$R_{*14(B)} = R_{y\partial} \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2} = 0,098 \cdot 250 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,463$$

$$R_{*15(B)} = R_{y\partial} \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2} = 0,098 \cdot 200 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,371$$

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

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

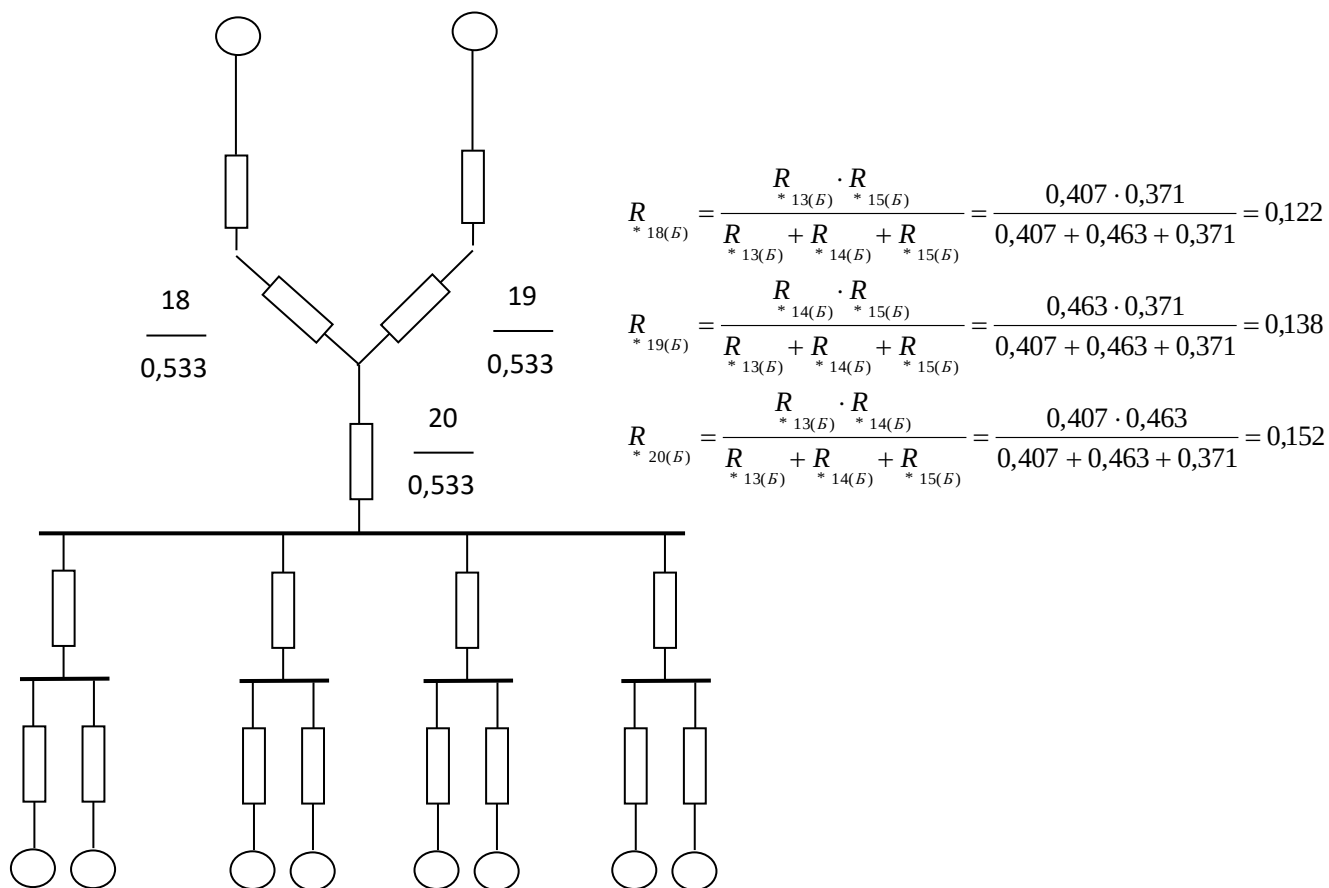


Рисунок 7 - Преобразование треугольника в звезду

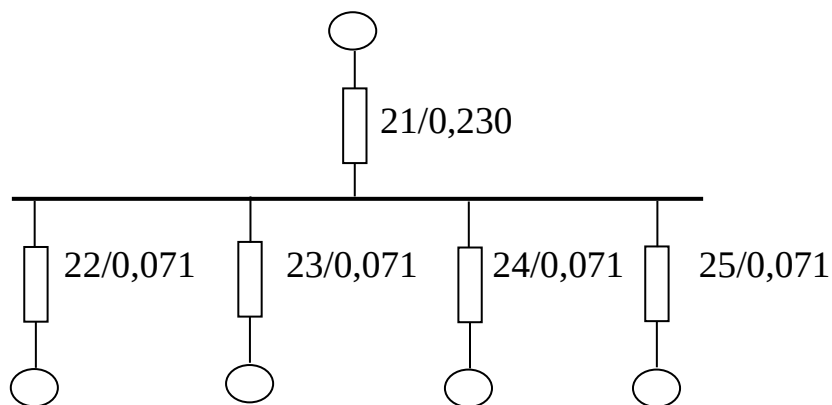


Рисунок 8 - Дальнейшее преобразование

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

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

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

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

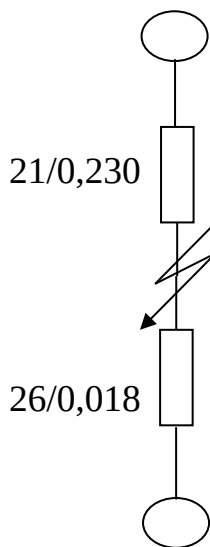


Рисунок 9

При расчете постоянной времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания используют эквивалентное индуктивное сопротивление схемы замещения обратной последовательности (в числителе формулы ниже). Его получают эквивалентированием схемы замещения, в которой все элементы расчетной схемы представлены сопротивлениями токам обратной последовательности. Учитывая то, что сопротивления токам прямой и обратной последовательностей отличаются у вращающихся машин, а у остальных элементов схемы совпадают, то достаточно пересчитать сопротивления обратной последовательности только для генераторов и оставить сопротивления остальных элементов прежними. В расчете приведено допущение о том, что сопротивления прямой и обратной последовательностей рассматриваемых гидрогенераторов также совпадают и пересчет эквивалентного сопротивления схемы замещения обратной последовательности не требуется.

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

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

$$k_{y\partial 11} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a11}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,158}} = 1,9387$$

$$k_{y\partial 16} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a16}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,163}} = 1,9405$$

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

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

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

Результаты расчета тока короткого замыкания:

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

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

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

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

$$T_{a16} = \frac{X_{*26(B)}}{\omega \cdot R_{*26(B)}} = \frac{0,919}{314 \cdot 0,018} = 0,163c \text{ (со стороны блоков)}$$