

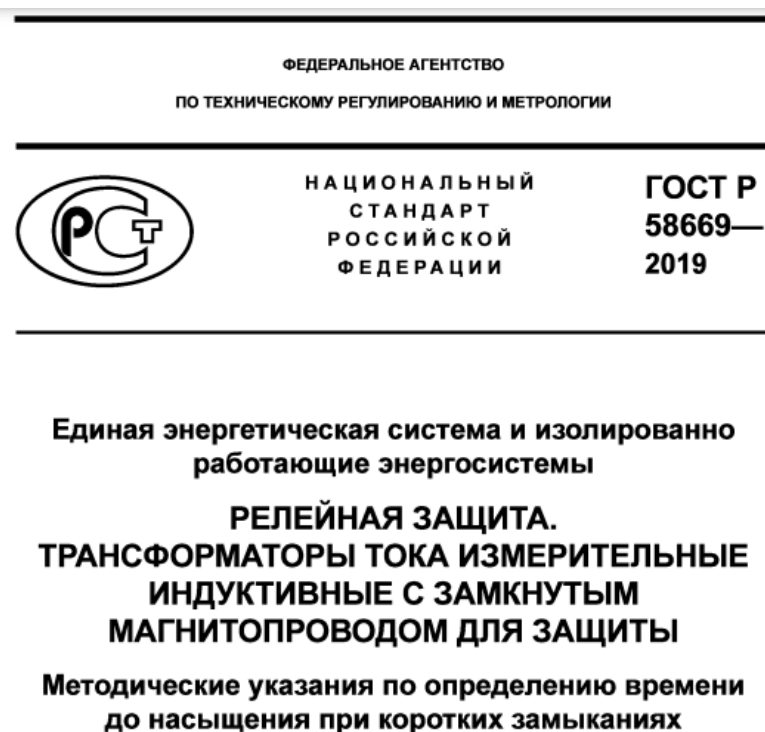
**Научно-практическая конференция «Измерительные  
трансформаторы тока»**

**Доклад на тему:**

**Оптимизация расчета времени до насыщения  
ТТ установленного на произвольном участке  
разветвленной электрической цепи**

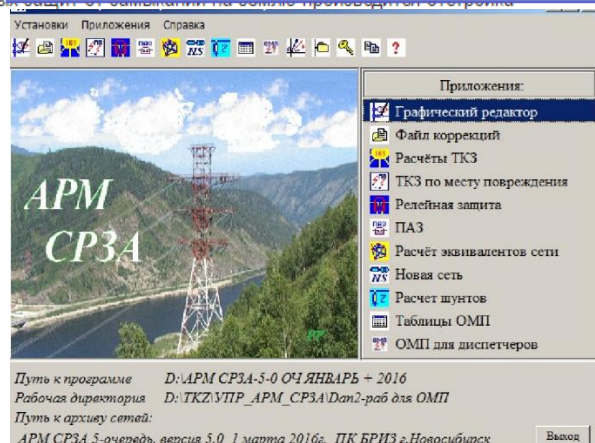
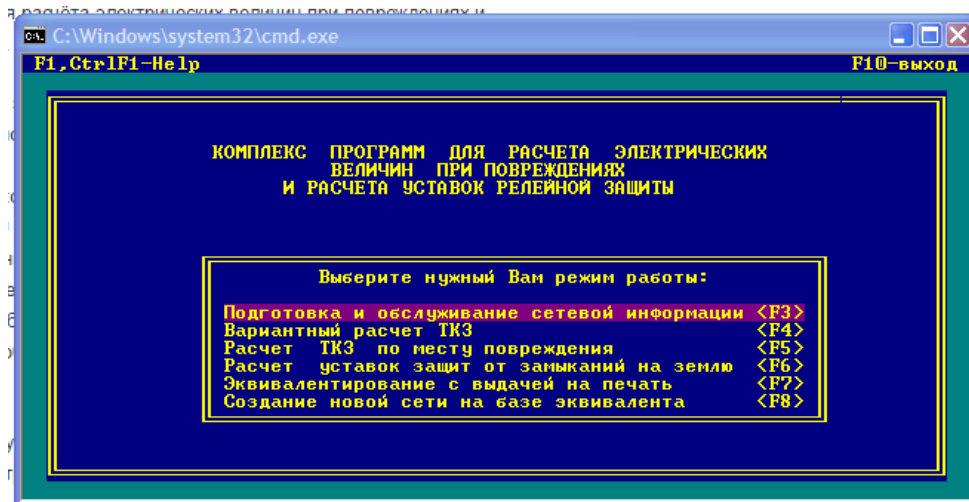
**В.А. СОЛОВЬЕВ, Е.Н. КОЛОБРОДОВ, Д.С. РЫБИН, И.А. МОСЕЙЧУК  
ГК «ТЕКОН»**

Выдержка из ГОСТ Р 58669-2019:  
4.2.5 При осуществлении  
подготовительных расчетов  
необходимо определить величину  
нагрузки во вторичных цепях ТТ и  
**постоянную времени Тэкв** для  
каждого из расчетных видов КЗ.

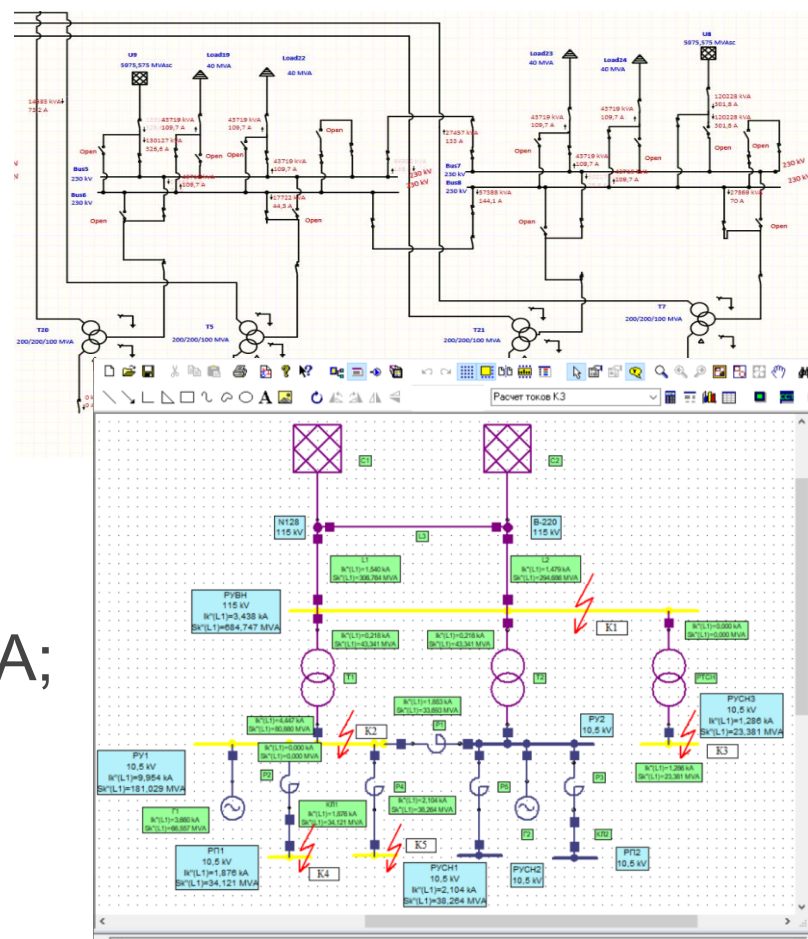


Издание официальное

Большинство ПТК для расчета ТКЗ не определяют постоянные времени затухания апериодической составляющей

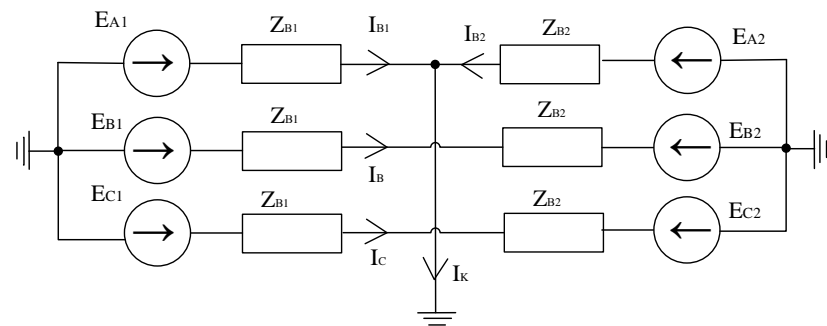
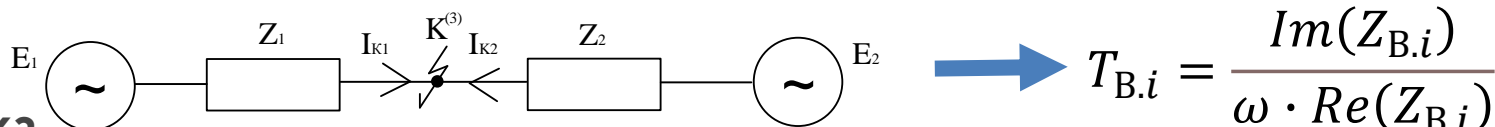


- ТКЗ 3000;
- АРМ СРЗА;
- Etap;
- Neplan
- И др.

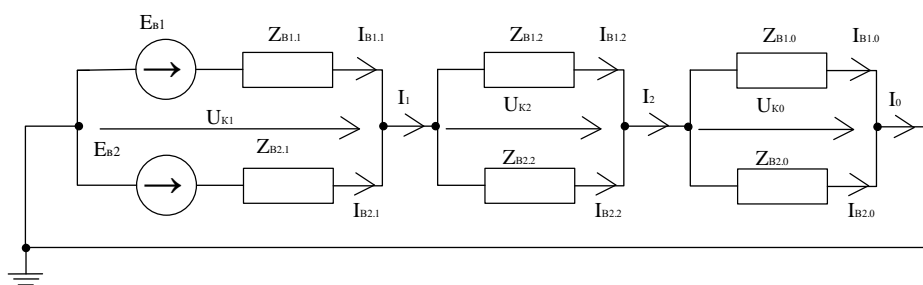


Аналитический расчет постоянной времени затухания апериодической составляющей токов подпитки несимметричного КЗ вызывает значительные затруднения

**Симметр. КЗ**



**Несимметр. КЗ**



$$i_{ап.t} = i_{ап.01} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + i_{ап.02} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} + i_{ап.0n} \cdot e^{-\frac{t}{T_n}} = i_{ап.ЭКВ.} \cdot e^{-\frac{t}{T_{ЭКВ.}}}$$

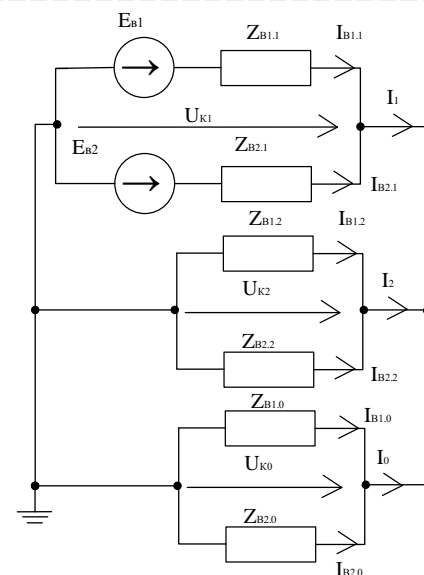
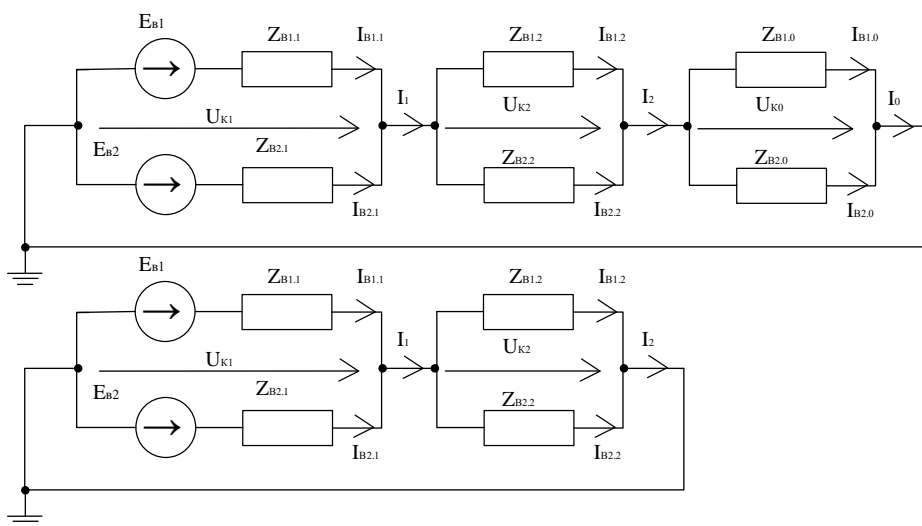
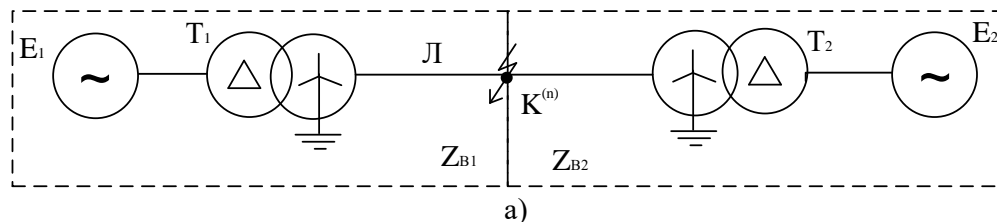
$$a_n \frac{d^n x_{св}}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_{св}}{dt^{n-1}} + \dots + a_k \frac{d^k x_{св}}{dt^k} + \dots + a_1 \frac{dx_{св}}{dt} + a_0 x_{св} = 0.$$

## **Возможности ПТК по расчету ТКЗ:**

- эквивалентирование схем замещения путем выделения интересующей ветви, где установлен ТТ;
- выделение сопротивлений симметричных составляющих ветвей;
- выделение токов симметричных составляющих в месте КЗ

## **Основные положения метода симметричных составляющих (МСС):**

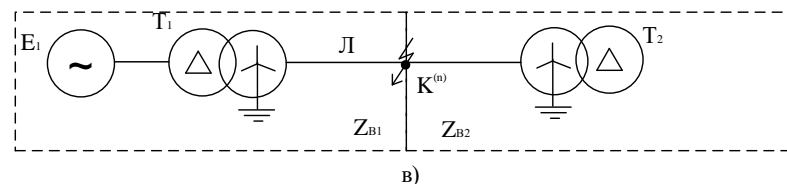
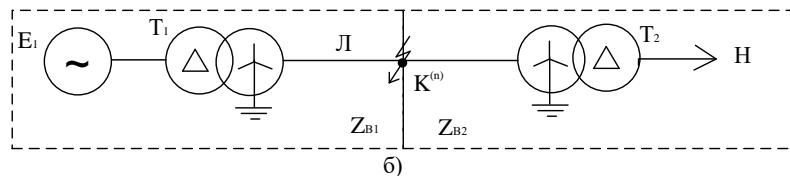
- МСС подчиняется законам Кирхгофа;
- Полный ток равен сумме токов симметричных составляющих.



## Комплексные схемы замещения для различных видов КЗ по МСС

$$\underline{I_B^{(n)}} = \underline{I_1^{(n)}} \cdot \underline{K_{T1}} + \underline{I_2^{(n)}} \cdot \underline{K_{T2}} + \underline{I_0^{(n)}} \cdot \underline{K_{T0}} = \underline{I_{B.1}^{(n)}} + \underline{I_{B.2}^{(n)}} + \underline{I_{B.0}^{(n)}}, (1)$$

$$\underline{K_{T1}} = \frac{\underline{K_E} \cdot \underline{Z_{BX.}} - \underline{Z_{ЭKB.2-0}}}{\underline{Z_{B.1}}}; \quad \underline{K_{T2}} = \frac{\underline{Z_2}}{\underline{Z_{B.2}}}; \quad \underline{K_{T0}} = \frac{\underline{Z_0}}{\underline{Z_{B.0}}}; \quad \underline{K_E} = \frac{\underline{E_B}}{\underline{E_{ЭKB}}} \quad (2)$$



## Коэффициенты токораспределения симметричных составляющих при различных видах КЗ по МС

Вид КЗ

Схема а с двухсторонним питанием

Схема б с односторонним питанием

Схема в с односторонним питанием

Подпитка от первой/второй ветви

Подпитка от первой ветви

Подпитка от второй ветви

Подпитка от первой ветви

Подпитка от второй ветви

$\frac{K_{T1}}{Z_{B1}}$

$\frac{K_{T2}}{Z_{B2}}$

$\frac{K_{T0}}{Z_{B0}}$

$\frac{K_{T1}}{Z_{B1}}$

$\frac{K_{T2}}{Z_{B2}}$

$\frac{K_{T0}}{Z_{B0}}$

$\frac{K_{T1}}{Z_{B1}}$

$\frac{K_{T2}}{Z_{B2}}$

$\frac{K_{T0}}{Z_{B0}}$

$\frac{K_{T1}}{Z_{B1}}$

$\frac{K_{T2}}{Z_{B2}}$

$\frac{K_{T0}}{Z_{B0}}$

$\frac{K_{T1}}{Z_{B1}}$

$\frac{K_{T2}}{Z_{B2}}$

$\frac{K_{T0}}{Z_{B0}}$

3

$\frac{1}{Z_{B1}}$

0

0

$\frac{1}{Z_{B1}}$

0

0

0

0

0

$\frac{1}{Z_{B1}}$

0

0

0

0

0

2 (BC)

$\frac{K_E \cdot (Z_1 + Z_2) - Z_2}{Z_{B1}}$

$\frac{Z_2}{Z_{B2}}$

0

$\frac{Z_1}{Z_{B1}}$

$\frac{Z_2}{Z_{B2}}$

0

$\frac{-Z_2}{Z_{B1}}$

$\frac{Z_2}{Z_{B2}}$

0

$\frac{Z_1}{Z_{B1}}$

$\frac{Z_2}{Z_{B2}}$

0

0

0

0

1,1 (BC)

$\frac{K_E \cdot \left( \frac{Z_1}{Z_2 + Z_0} + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0} \right) - \left( \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0} \right)}{Z_{B1}}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{Z_1}{Z_{B1}}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}$

$\frac{3 \cdot Z_0}{Z_{B0}}$

1 (A)

$\frac{K_E \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_0) - (Z_2 + Z_0)}{Z_{B1}}$

$\frac{Z_2}{Z_{B2}}$

$\frac{Z_0}{Z_{B0}}$

$\frac{Z_1}{Z_{B1}}$

$\frac{Z_2}{Z_{B2}}$

$\frac{Z_0}{Z_{B0}}$

$\frac{Z_1}{Z_{B1}}$

$\frac{Z_2}{Z_{B2}}$

$\frac{Z_0}{Z_{B0}}$

$\frac{Z_1}{Z_{B1}}$

$\frac{Z_2}{Z_{B2}}$

$\frac{Z_0}{Z_{B0}}$

0

0

$\frac{3 \cdot Z_0}{Z_{B0}}$

Выражения для полного тока ветви и его постоянная времени  $T_{\text{ЭКВ.В}}$

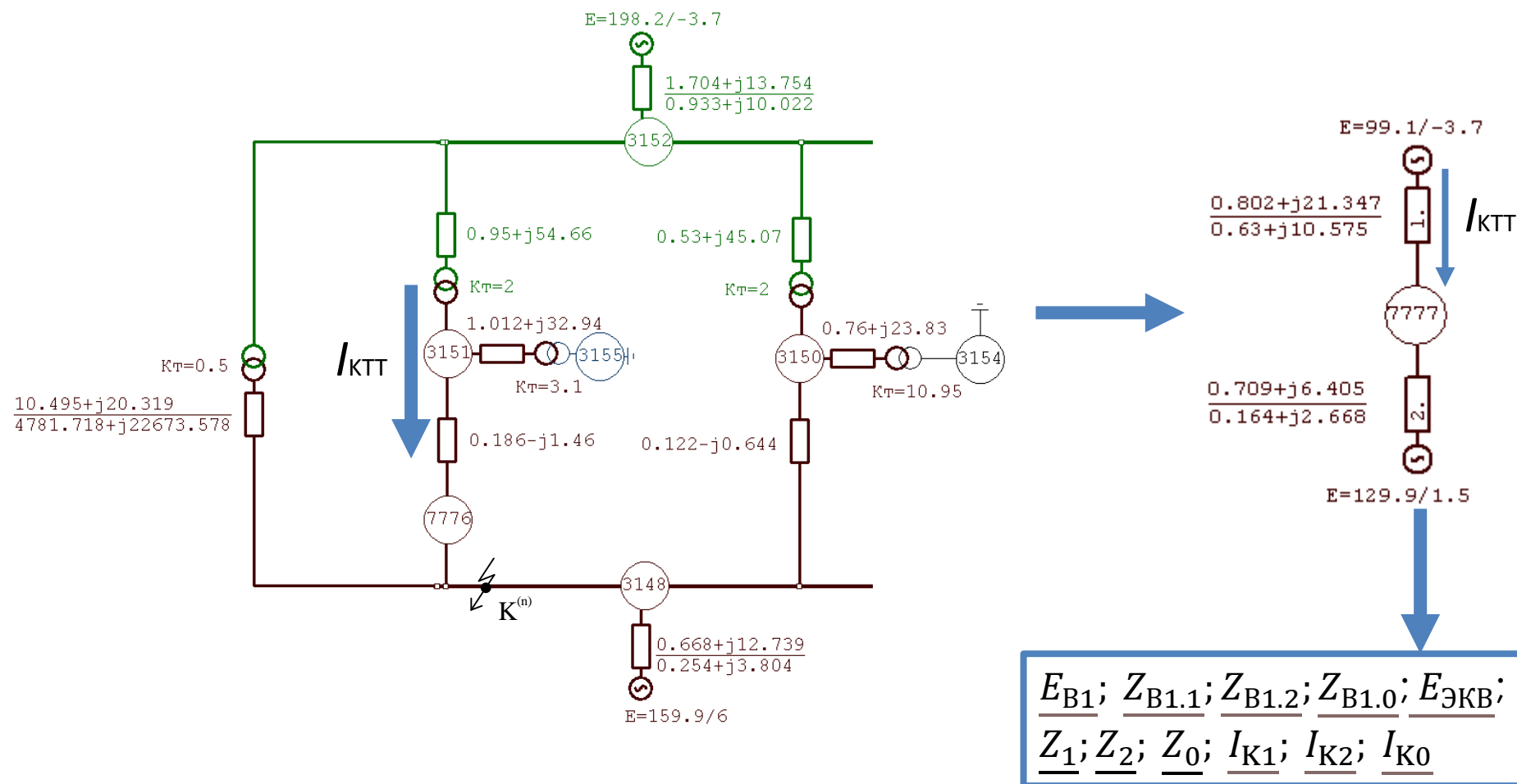
$$i_t = \sqrt{2} \cdot (i_{B.1} \cdot e^{-\frac{t}{T_{B.1}}} + i_{B.2} \cdot e^{-\frac{t}{T_{B.2}}} + i_{B.0} \cdot e^{-\frac{t}{T_{B.0}}} + (i_{B.1} + i_{B.2} + i_{B.0}) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{i_B})), (3)$$

$$T_{B.i} = \frac{\text{Im}(Z_{B.i})}{\omega \cdot \text{Re}(Z_{B.i})}, (4)$$

$$T_{\text{ЭКВ.В}} = \left| \frac{\underline{I_{B.1}} \cdot T_{B.1} + \underline{I_{B.2}} \cdot T_{B.2} + \underline{I_{B.0}} \cdot T_{B.0}}{\underline{I_{B.1}} + \underline{I_{B.2}} + \underline{I_{B.0}}} \right| (5)$$



## 1 Шаг: Исходные данные из АРМ СРЗА



2 Шаг: Определение коэффициентов токораспределения и токов симметричных составляющих тока подпитки  $I_{КТТ}$

$$\underline{K}_{T1} = \frac{\underline{K}_E \cdot (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0) - (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0)}{\underline{Z}_{B1.1}} =$$

$$= \frac{(0,806 - i \cdot 0,062) \cdot (1,054 + i \cdot 11,993) - (0,592 + i \cdot 7,062)}{0,802 + i \cdot 21,347} = 0,121 - i \cdot 0,042 \text{ о. е.};$$

$$\underline{K}_{T2} = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_{B1.2}} = \frac{0,462 + i \cdot 4,931}{0,801 + i \cdot 21,347} = 0,232 - i \cdot 0,013 \text{ о. е.};$$

$$\underline{K}_{T0} = \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_{B1.0}} = \frac{0,130 + i \cdot 2,131}{0,630 + i \cdot 10,575} = 0,202 - i \cdot 0,0003 \text{ о. е.}$$

$$\underline{I}_{B1.1}^{(1)} = \underline{I}_{K1} \cdot \underline{K}_{T1} = (587,79 - i \cdot 5848,50) \cdot (0,121 - i \cdot 0,042) = -174,52 - i \cdot 732,36 \text{ A};$$

$$\underline{I}_{B1.2}^{(1)} = \underline{I}_{K2} \cdot \underline{K}_{T2} = (587,79 - i \cdot 5848,50) \cdot (0,232 - i \cdot 0,013) = 60,34 - i \cdot 1364,50 \text{ A};$$

$$\underline{I}_{B1.0}^{(1)} = \underline{I}_{K0} \cdot \underline{K}_{T0} = (587,79 - i \cdot 5848,50) \cdot (0,202 - i \cdot 0,0003) = 116,98 - i \cdot 1181,60 \text{ A};$$

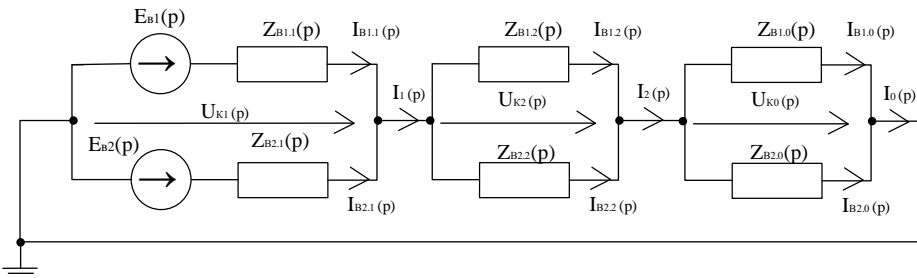
$$\underline{I}_{КТТ}^{(1)} = \underline{I}_{B1.1}^{(1)} + \underline{I}_{B1.2}^{(1)} + \underline{I}_{B1.0}^{(1)} = 2,79 - i \cdot 3278,50 = 3278,50 \cdot e^{-i \cdot 89,95^\circ} \text{ A}$$

3 Шаг: Определение постоянной времени затухания апериодической составляющей тока подпитки  $I_{\text{КТТ}}$

$$T_{B1.1} = T_{B1.2} = \frac{\text{Im}(Z_{B1.1})}{\omega \cdot \text{Re}(Z_{B1.1})} = \frac{21,347}{2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 0,802} = 0,085 \text{ с};$$

$$T_{B1.0} = \frac{\text{Im}(Z_{B1.0})}{\omega \cdot \text{Re}(Z_{B1.0})} = \frac{10,575}{2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 0,63} = 0,053 \text{ с};$$

$$T_{\text{ЭКВ.}} = \left| \frac{\underline{I_{B.1}} \cdot T_{B.1} + \underline{I_{B.2}} \cdot T_{B.2} + \underline{I_{B.0}} \cdot T_{B.0}}{\underline{I_{B.1}} + \underline{I_{B.2}} + \underline{I_{B.0}}} \right| = \left| \frac{-3,51 - i \cdot 240,86}{-97,20 - i \cdot 3278,5} \right| = 0,073 \text{ с.}$$



$$E := \frac{(40853.67290 + 511.1611883 \cdot i) \sqrt{3}}{p - i \cdot \omega}$$

$$UK1 := \frac{E \cdot (Z2 + Z0)}{Z1 + Z2 + Z0}$$

$$UK2 := \frac{E \cdot Z2}{Z1 + Z2 + Z0}$$

$$UK0 := \frac{E \cdot Z0}{Z1 + Z2 + Z0}$$

$$IV11 := ((ZV21) * ((EV1) - (UK1))) / ((ZV21) * (ZV11))$$

$$IV12 := ((UK2) * (Z22 + R22)) / ((Z22 + R22) * (Z12 + R12))$$

$$IV10 := ((UK0) * (Z20 + R20)) / ((Z20 + R20) * (Z10 + R10))$$

$$IK1 := IV11 + IV12 + IV10$$

simplify

inverse Laplace transform

$$1178.518178 \cdot e^{-18.71587113t} + 2091.814790 \cdot e^{-11.80286367t} + 3270.333048 \cdot \sin(100 \pi t - 1.571018106) e^{314.1592654t}$$

$$E := \frac{(40853.67290 + 511.1611883 \cdot i) \sqrt{3}}{p - 100 \cdot i \pi}$$

$$UK1 := \frac{24045.76184 + 397.3805598 \cdot i \sqrt{3}}{p - 100 \cdot i \pi}$$

$$UK2 := \frac{16807.91105 + 113.7806250 \cdot i \sqrt{3}}{p - 100 \cdot i \pi}$$

$$UK0 := \frac{7237.850784 + 283.5999341 \cdot i \sqrt{3}}{p - 100 \cdot i \pi}$$

$$IV11 := \frac{(8918.71741 - 2529.097810 \cdot i) \sqrt{3}}{(p - 100 \cdot i \pi) (0.06794961139 p + 0.802)}$$

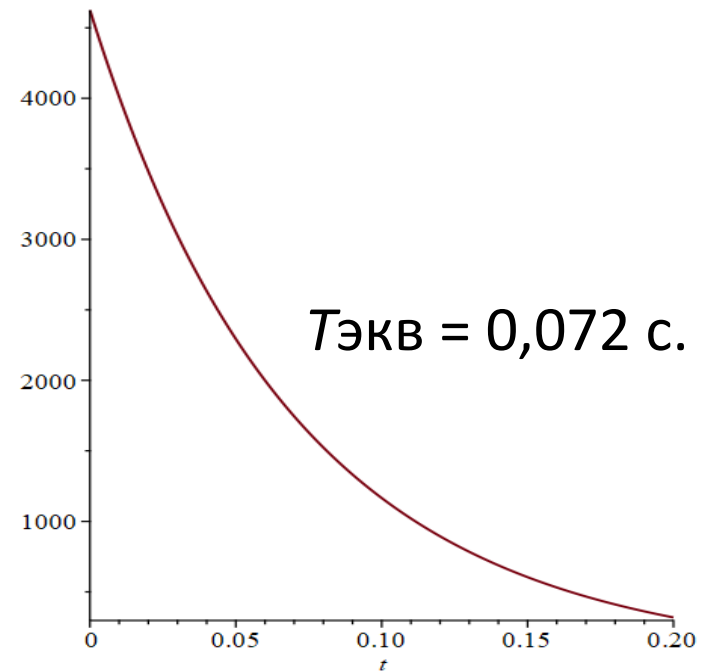
$$IV12 := \frac{(16807.91105 + 113.7806250 \cdot i) \sqrt{3}}{(p - 100 \cdot i \pi) (0.06794961139 p + 0.802)}$$

$$IV10 := \frac{(7237.850784 + 283.5999341 \cdot i) \sqrt{3}}{(p - 100 \cdot i \pi) (0.63 + 0.03366127046 p)}$$

$$IK1 := \frac{(25726.62846 - 2415.317185 \cdot i) \sqrt{3}}{(p - 100 \cdot i \pi) (0.06794961139 p + 0.802)} + \frac{(7237.850784 + 283.5999341 \cdot i) \sqrt{3}}{(p - 100 \cdot i \pi) (0.63 + 0.03366127046 p)}$$

$$\frac{-38126.82429 + 2241.624798 \cdot i + (-2351.778842 + 107.4428177 \cdot i) p}{(0.06794961139 p + 0.802) (314.1592654 \cdot i - p) (0.63 + 0.03366127046 p)}$$

$$\text{plot}(\sqrt{2} \cdot (1178.518178 \cdot e^{-18.71587113t} + 2091.814790 \cdot e^{-11.80286367t}), t = 0 \dots 0.2)$$



$T_{\text{экв}} = 0,072 \text{ с.}$

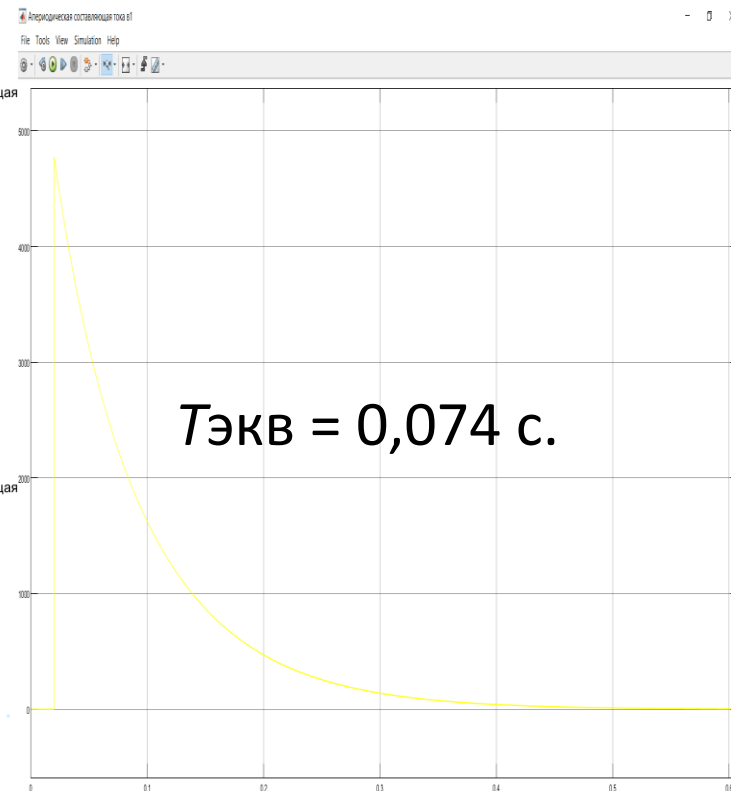
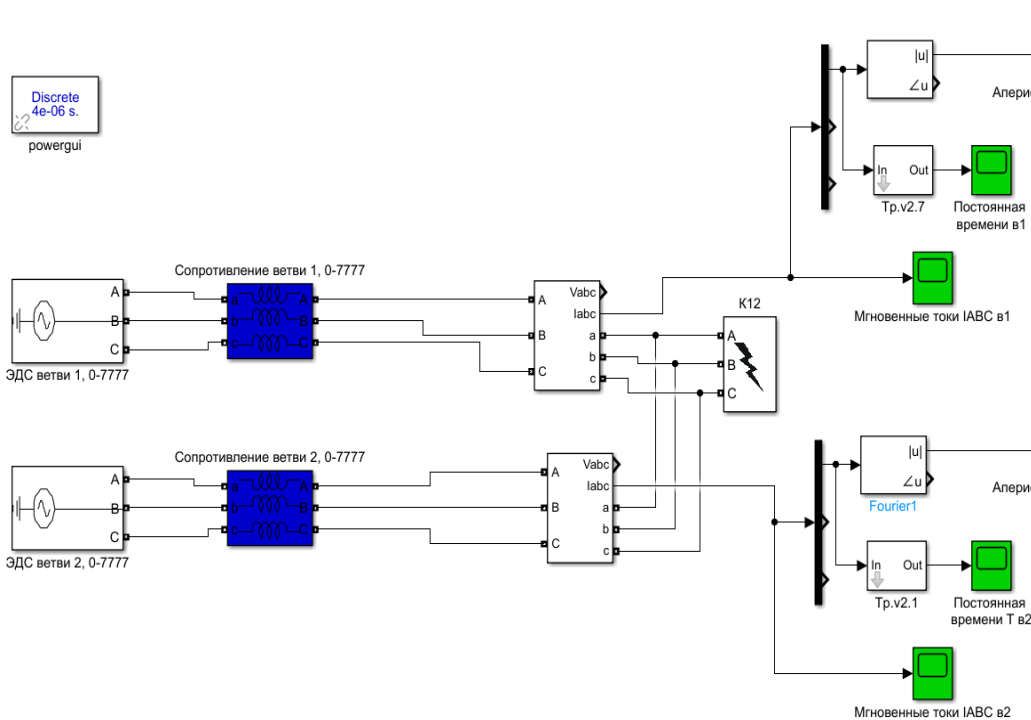
$$1178.518178 \cdot e^{-18.71587113t} + 2091.814790 \cdot e^{-11.80286367t} = \frac{(1178.518178 + 2091.814790) \exp(1)}{\exp(1)}$$

$$1178.518178 \cdot e^{-18.71587113t} + 2091.814790 \cdot e^{-11.80286367t} = \frac{3270.332968}{e}$$

solve

Warning, solutions may have been lost

{t=0.07184231565}, {t=-0.07819047004 + 0.4211040013 i}, {t=0.02345645010 - 0.57298 i}



- 1) Предложен универсальный метод расчета постоянной времени затухания тока подпитки в разветвленной цепи для любых видов КЗ.
- 2) Метод основан на применении исходных данных от известных программных комплексов расчета токов КЗ (например АРМ СРЗА или ТКЗ 3000).
- 3) Метод сводится к проведению ряда элементарных расчетов, которые легко поддаются автоматизации.



ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ, КАЧЕСТВО,  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

г. Москва, 3-я Хорошевская улица, дом 20  
тел.: (495) 730-41-12, факс: (495) 730-41-13  
e-mail: [info@tecon.ru](mailto:info@tecon.ru)  
[www.tecon.ru](http://www.tecon.ru)