

Токи короткого замыкания в СЭЭС

Под коротким замыканием (КЗ) понимают:

- замыкание между фазами в сети переменного тока и полюсами в сети постоянного тока;
- в четырехпроводной системе переменного тока – замыкание между фазой или фазами и нулевым проводом;
- в системах с заземленной нейтралью переменного тока - замыкание между фазой или фазами и корпусом судна.

В зависимости от характера КЗ различают:

- металлическое (глухое) КЗ, напряжение в месте замыкания практически равно нулю;
- неглухое КЗ – замыкание через электрическую дугу, напряжение в месте замыкания достигает значительной величины.

Короткие замыкания возникают из-за:

- попадания в электрооборудование посторонних предметов, воды;
- в результате пробоя изоляции, в том числе при ее загрязнении;
- при разрушениях крепежа токоведущих частей;
- в результате действий обслуживающего персонала и т.д.

Последствиями КЗ в СЭЭУ являются:

- пожар с выделением токсичных веществ, вследствие горения конструктивных и изоляционных материалов;
- разрушение оборудования электрической дугой;
- повреждение оборудования в результате электродинамического и термического действия тока КЗ;
- значительное снижение напряжения в судовой сети.

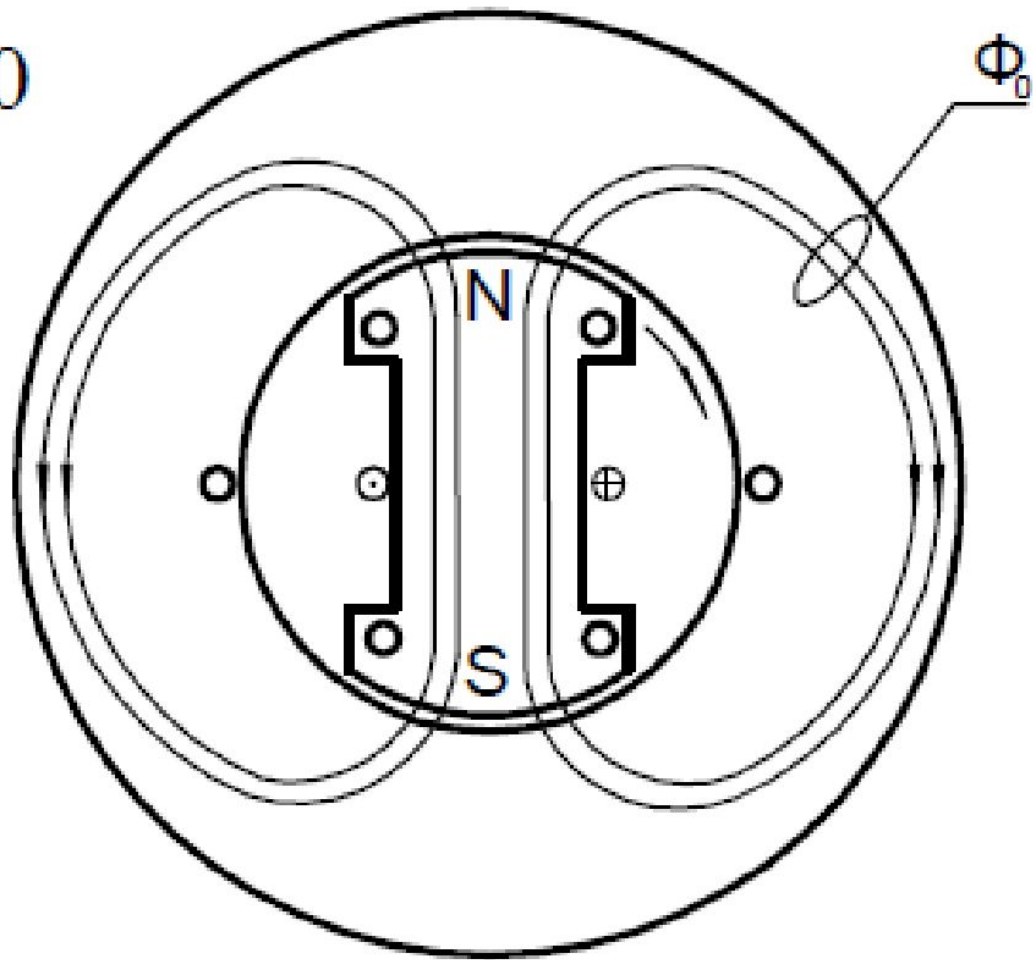


Рассмотрим наиболее тяжелый из возможных случаев – трехфазное симметричное металлическое КЗ на зажимах генератора.

Синхронный генератор – явнополюсный, имеет три обмотки с относительно малыми активными сопротивлениями:

- трехфазную статорную обмотку;
 - обмотку возбуждения;
 - успокоительную обмотку.
1. До КЗ генератор работал в режиме холостого хода, т.е. магнитная система электрической машины не насыщена.
 2. Токи в статорной обмотке равны нулю.
 3. Постоянный ток возбуждения создает магнитный поток F_0 , который пересекая статорную обмотку, наводит в ее фазах синусоидальные электродвижущие силы E_0 .
 4. В успокоительной обмотке ток отсутствует.

$t = 0$



При коротком замыкании в фазах статорной обмотки ток КЗ достигает разных значений в зависимости от их положения в момент КЗ ($t = 0$) относительно полюсов ротора. Наибольшее значение тока будет в фазе статора, которая в момент КЗ имела наибольшее потокоцепление Ψ_0 с магнитным потоком обмотки возбуждения.

ЭДС этой фазы будет равна нулю т. $\frac{d\Phi_0}{dt} = 0$

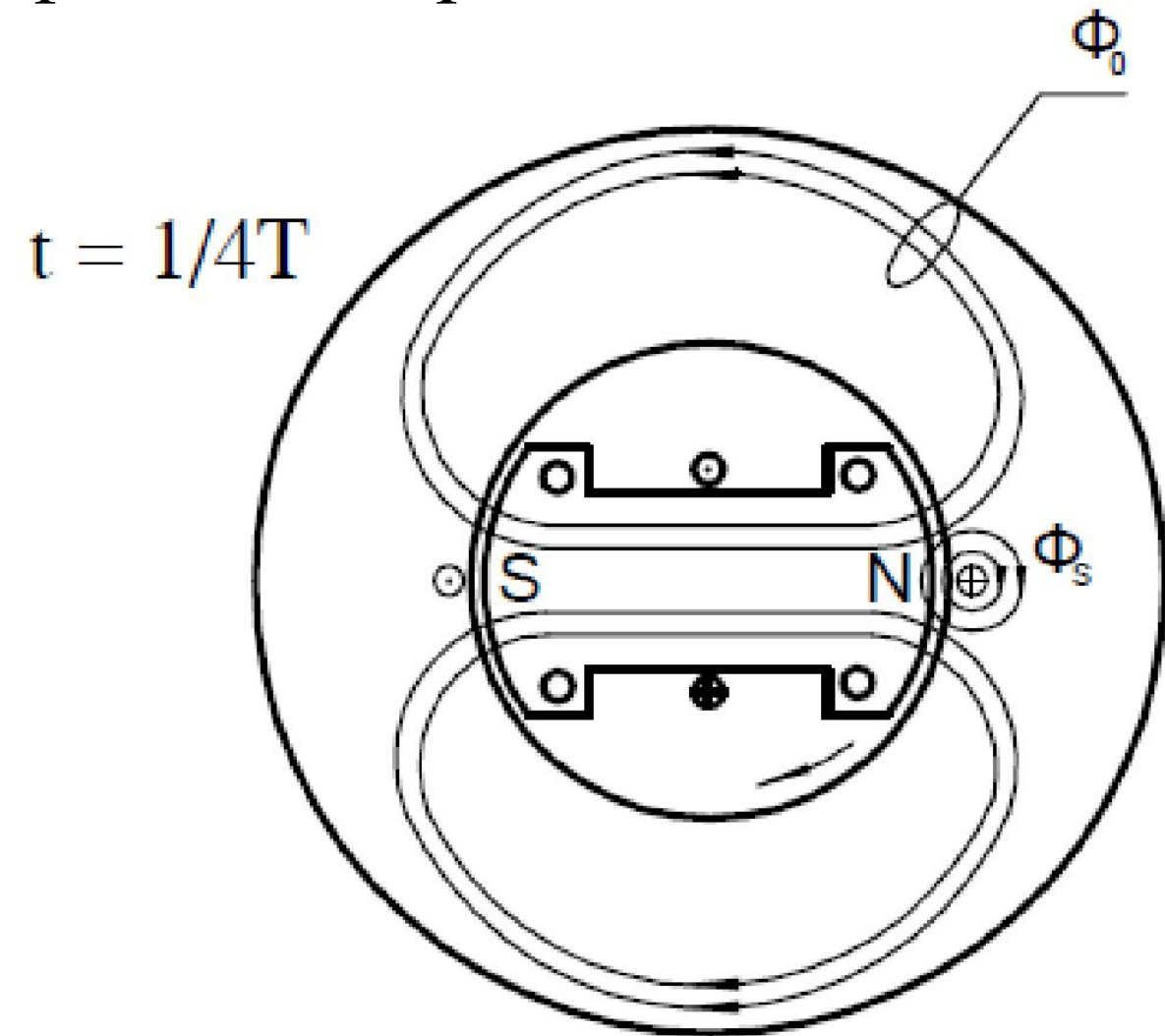
к.

Для упрощения будем рассматривать на статоре только эту фазу статорной обмотки, и заменим каждую обмотку генератора одним витком. В этом случае $\Psi_0 = \Phi_0$.

Учитывая пренебрежимо малые значения активных сопротивлений и значительные индуктивности обмоток генератора, а также то, что рассматриваемый временной интервал КЗ измеряются несколькими периодами переменного тока, можно с небольшой погрешностью считать эти обмотки как сверхпроводящие контуры.

Для таких контуров характерен принцип постоянства потокосцепления, т.е. в рассматриваемый период КЗ в любой момент времени с каждой из обмоток должен быть сцеплен магнитный поток, который оценивается числом и направлением силовых линий, как и в момент КЗ ($t=0$).

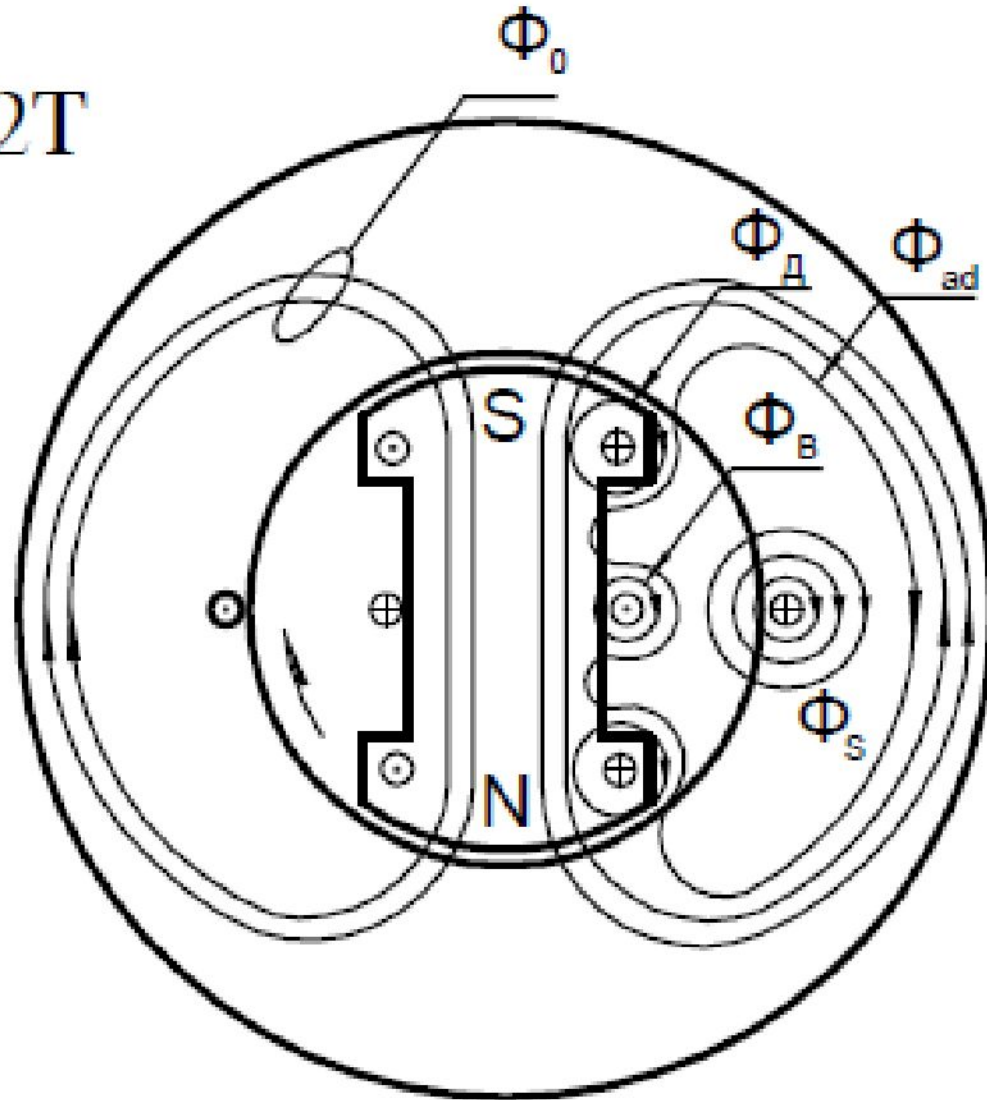
Через $\frac{1}{4}$ периода поток Φ_0 выходит из зацепления с рассматриваемой фазой статорной обмотки.



Учитывая принцип постоянства потокосцепления, протекающий по ней ток КЗ должен быть такого значения и направления, чтобы восстановить первоначальное потокосцепление с этой фазой. Поэтому поток рассеивания Φ_s оценивается в две силовые линии, которые направлены в том же направлении, что и поток возбуждения Φ_0 в момент КЗ ($t=0$).

Через $\frac{1}{2}$ периода ротор развернется на 180° . Направление потока Φ_0 изменится на противоположное.

$t = 1/2T$



Для компенсации данного изменения по фазе статорной обмотки должен протекать ток КЗ такого значения и направления, что бы суммарное потокоцепление оценивалось все теми же двумя силовыми линиями.

Ток КЗ создает магнитный поток реакции якоря Φ_{ad} действующий по продольной оси (преобладает

индуктивное сопротивление в ОС)

Поток реакции якоря, проникнув в ротор, огибает обмотку возбуждения и успокоительную обмотку. В силу свойств сверхпроводимости в этих контурах возникают токи (в обмотке возбуждения это дополнительная свободная составляющая тока) и магнитные потоки рассеивания Φ_B и Φ_D , которые препятствуют изменению первоначальных потокоцеплений с ними. Поток реакции якоря Φ_{ad} вытесняется в воздушное пространство на пути замыкания потоков Φ_B и Φ_D .

Магнитные сопротивления путей, по которым замыкаются потоки в генераторе, в основном определяются участками их замыкания по воздуху. Поэтому магнитное сопротивление потока Φ_{ad} равно:

$$R'' = R + R + R$$

R_{ad} – магнитное сопротивление воздушного зазора между статором и ротором;

R_B - магнитное сопротивление на пути потока Φ_B ;

R_D - магнитное сопротивление на пути потока Φ_D .

Магнитная проводимость потока реакции статора Φ_{ad} :

$$\lambda''_{ad} = \frac{1}{R_{ad} + R_B + R_D} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{ad}} + \frac{1}{\lambda_B} + \frac{1}{\lambda_D}}$$

Из сопоставления законов Ома для электрических и магнитных цепей следует, что магнитная проводимость пути потоков обмотки статора пропорциональна ее индуктивному сопротивлению.

$$I = E_o / Z_d = E_o / X_d; \quad \Phi_i = I W_i / R_m, \quad I W_i = \Phi_i / \lambda_i. \quad \lambda_i \sim X_d$$

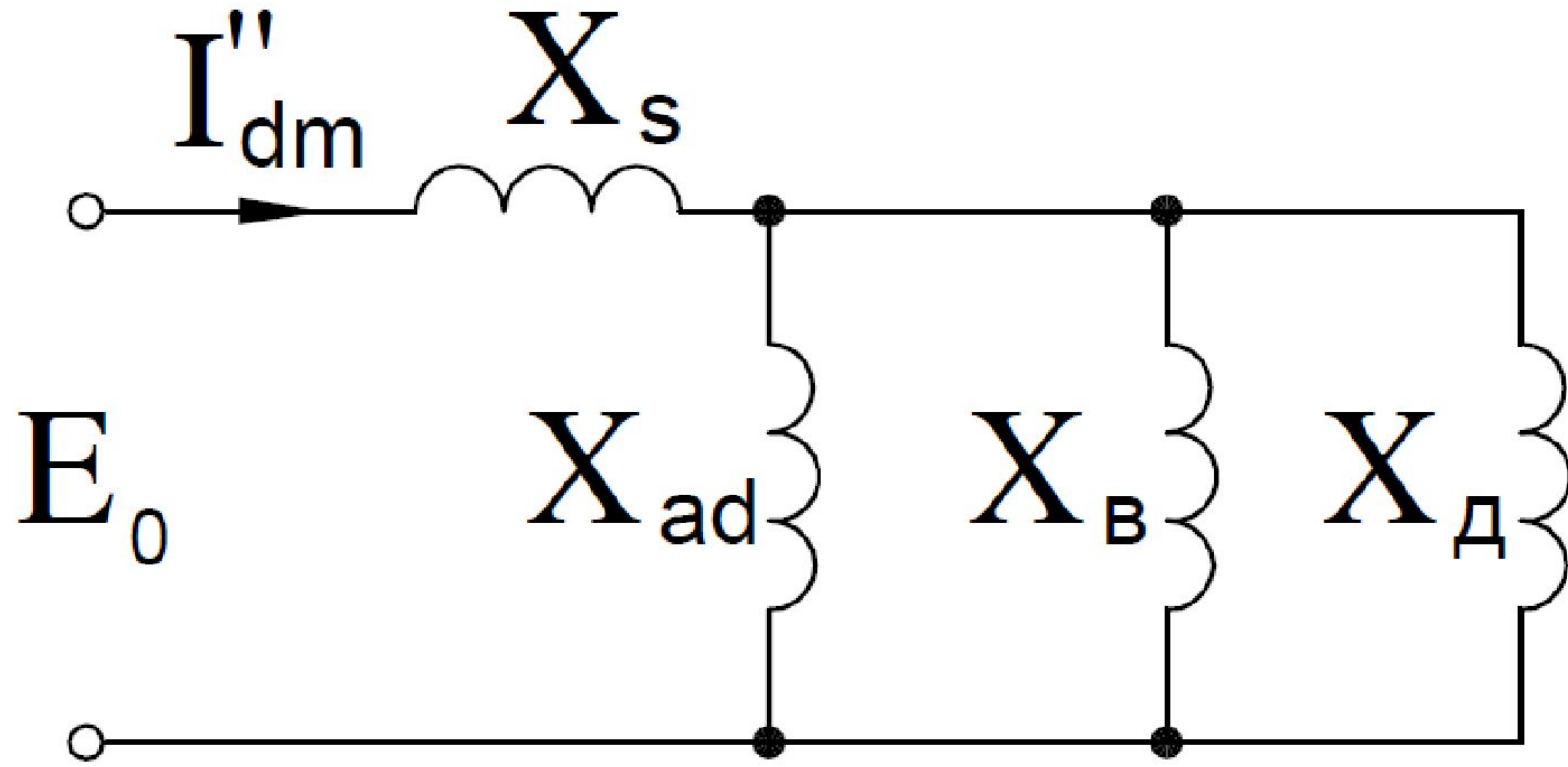
Следовательно:

$$X''_d = X''_{ad} + X_s = \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_B} + \frac{1}{X_D}} + X_s$$

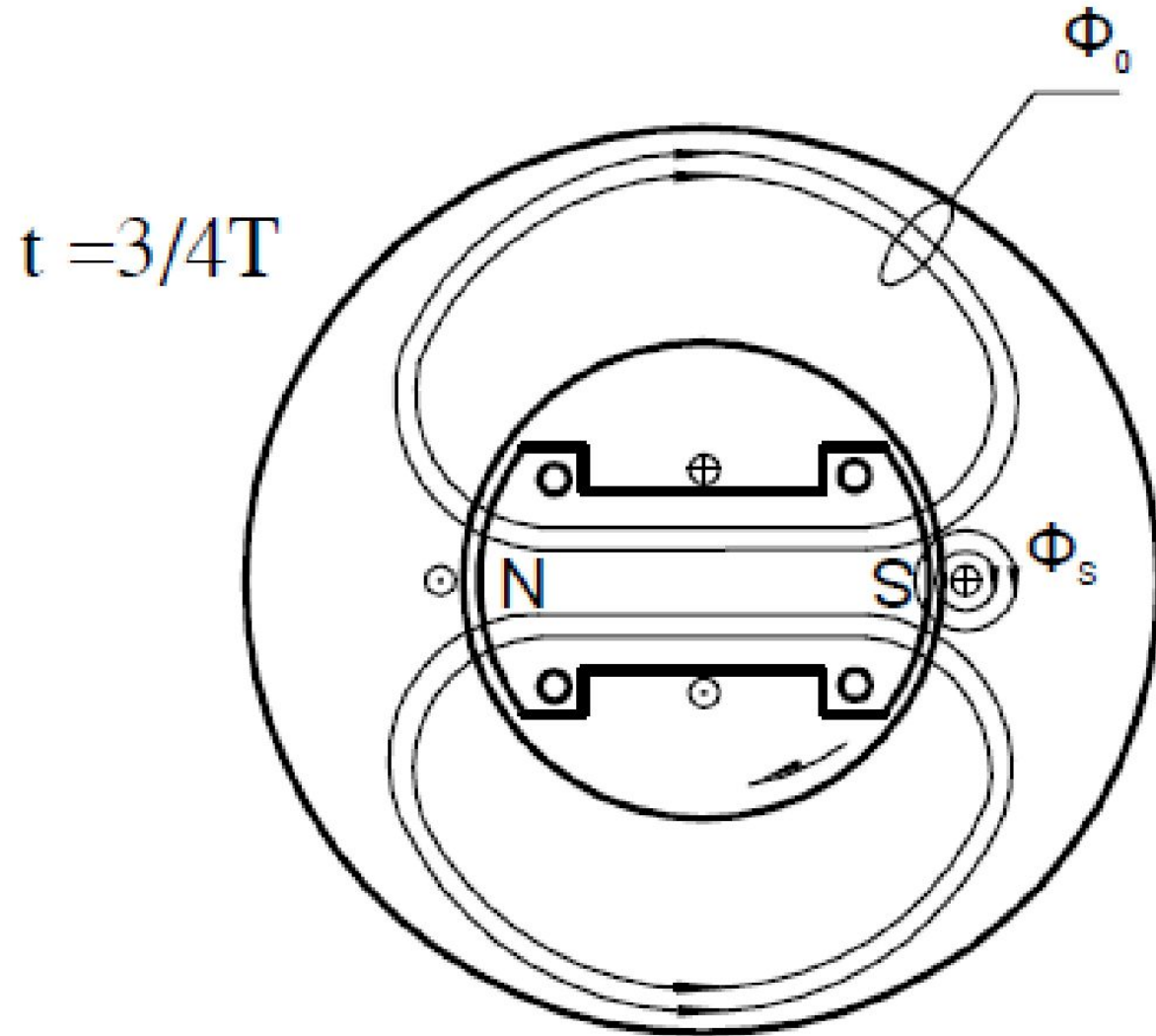
где X_s индуктивное сопротивление
потока рассеивания Φ_s

X''_d называется **продольным сверхпереходным сопротивлением**
обмотки статора.

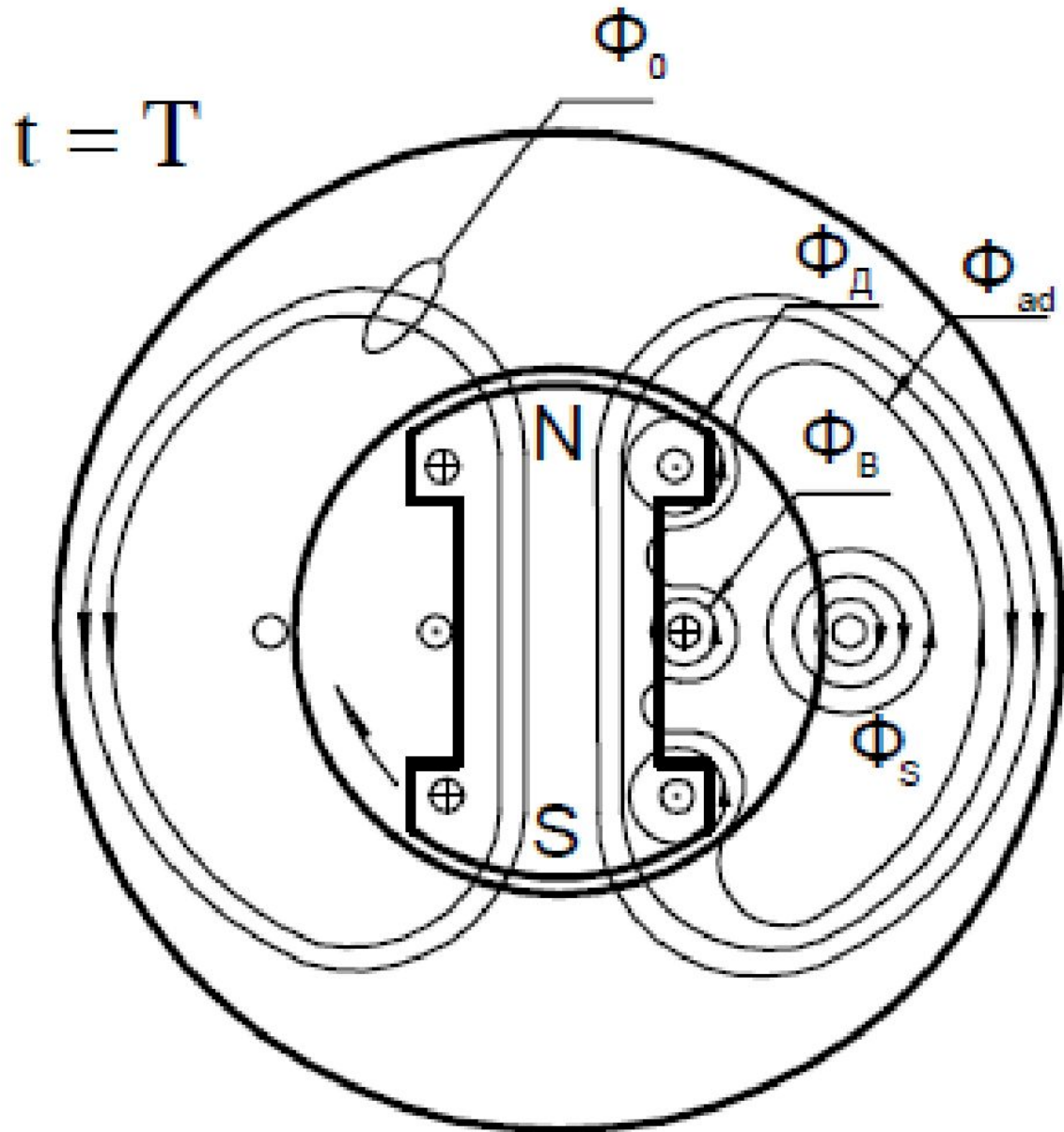
Схема замещения
статорной обмотки в
этот период КЗ,
который называется
сверхпереходным,
имеет следующий вид



Через $\frac{3}{4}$ периода по фазе обмотки статора будет протекать ток КЗ, который создает поток рассеивания Φ_s неизменного направления, т.к. поток Φ_0 выйдет из зацепления с ней.



Через $t = T$ ротор совершит полный оборот. Поток реакции якоря изменит направление на 180°



В течение нескольких периодов картина магнитных потоков, сцепленных с фазой обмотки статора, будет практически повторяться.

В каждый рассматриваемый момент, кроме первого ($t = 0$), с фазой ОС будет сцеплен магнитный поток рассеивания постоянного направления, который условно оценивается двумя силовыми линиями. Такой поток может создаваться только постоянным током, который называется апериодической составляющей тока КЗ (i_a). Поток реакции статора и часть потока рассеивания, периодически изменяются по значению и направлению, создаются периодической составляющей сверхпереходного тока КЗ (i_n).

Максимальное значение периодическая составляющая сверхпереходного тока КЗ определяется:

$$I''_{dm} = \frac{\sqrt{2}E_o}{X''_d}$$

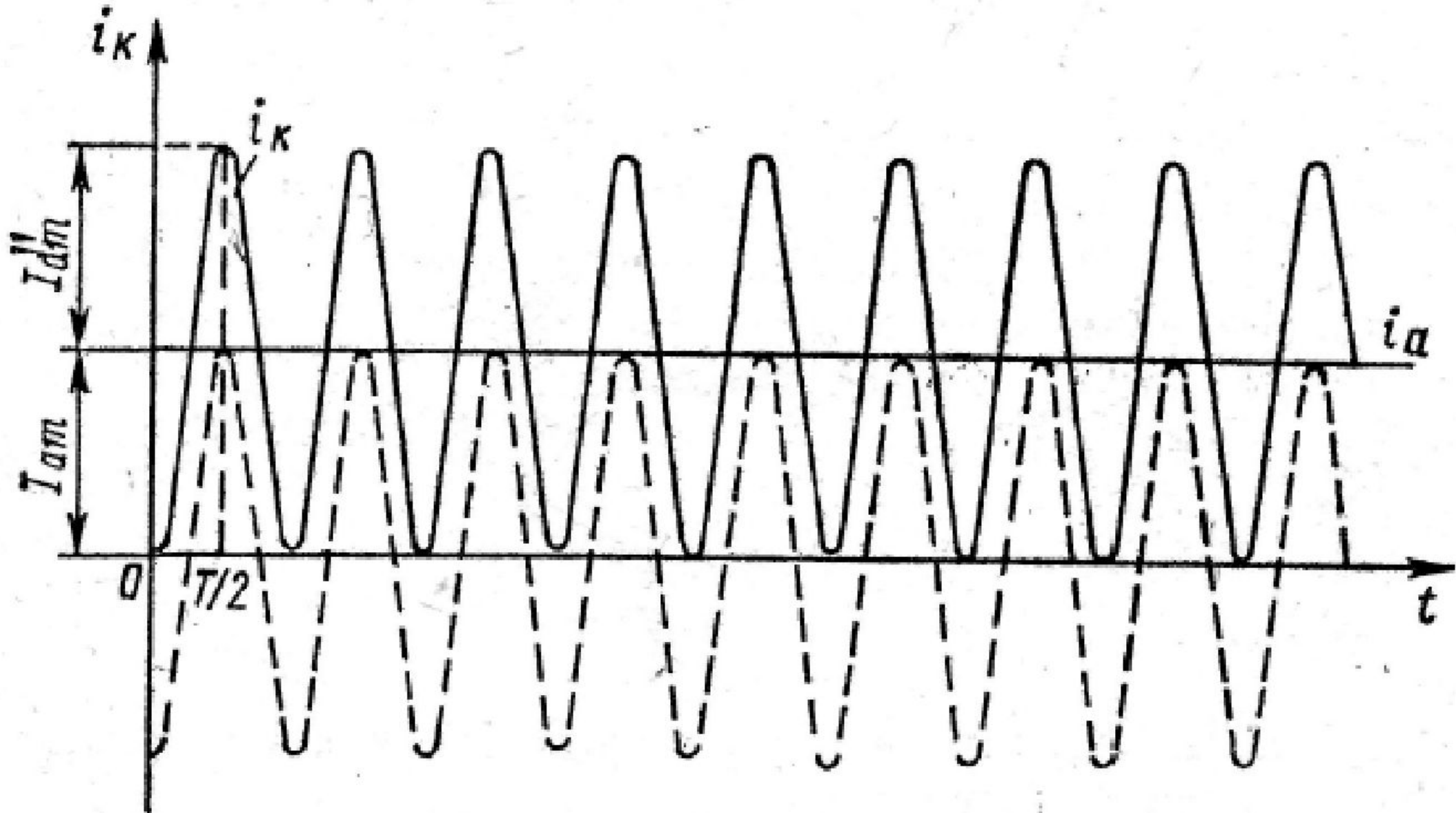
Так как в момент $t = 0$ мгновенное значение тока КЗ (i_k) равно нулю: $i_k = i_n + i_a = 0$ и $i_a = -i_n$, то начальное значение апериодической составляющей тока КЗ будет равна:

$$I_{am} = -I''_{dm}$$

Наличие активных сопротивлений обмоток генератора в реальном случае приводит к затуханию в них токов. За время $0,06 \dots 0,1$ с с постоянной времени T''_d происходит затухание тока в успокоительной обмотке. Поток реакции якоря Φ_{ad} проникнет в сталь ротора вблизи успокоительной обмотки. Магнитное сопротивление пути потока уменьшится до величины:

$$R'_{ad} = R_{ad} + R_{в'}, \text{ т.к. } R_D = 0$$

Изменение во времени периодической составляющей тока (i_n), аperiodической составляющей тока (i_a) и тока КЗ (i_k).

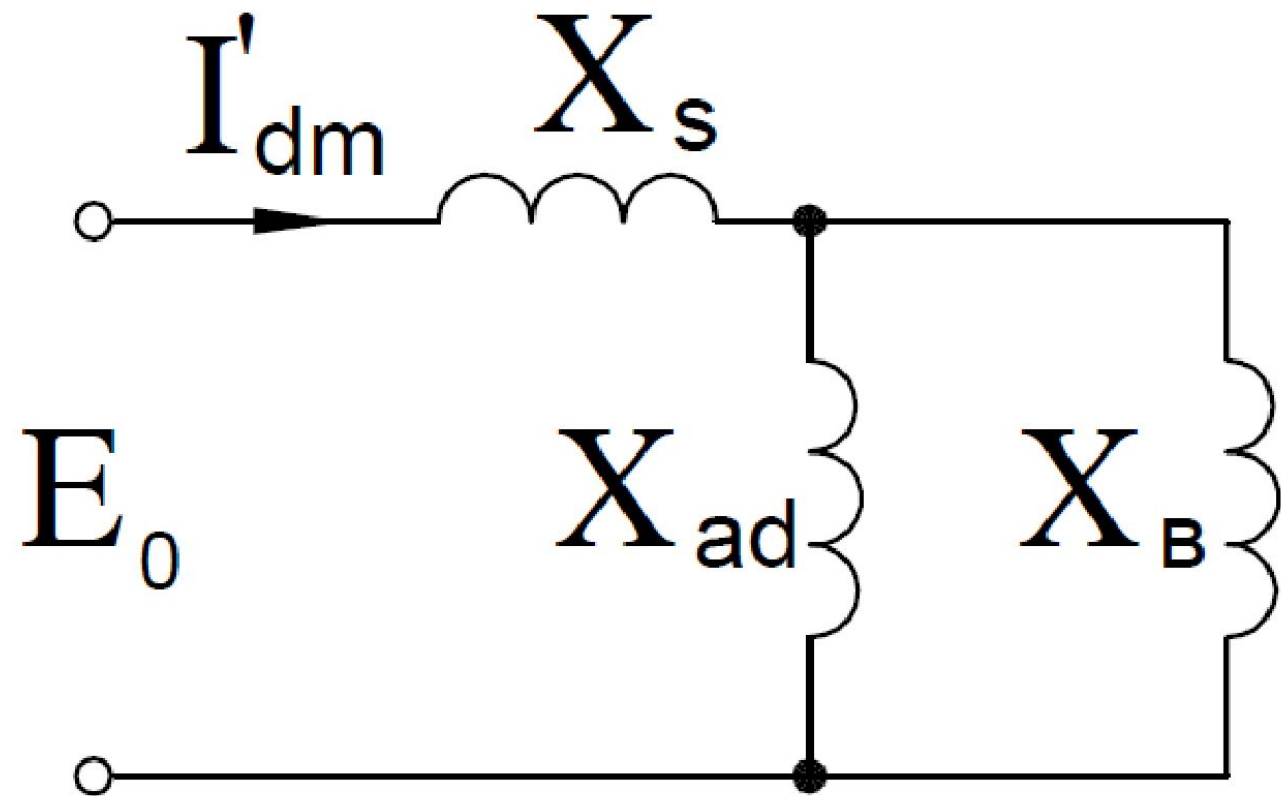


Соответственно изменится индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$X'_d = \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_B}} + X_s \quad \text{т.к. } X_D \rightarrow \infty$$

Где X'_d - переходное продольное индуктивное сопротивление фазы обмотки статора.

Схема замещения фазы обмотки статора для переходного режима КЗ примет вид:

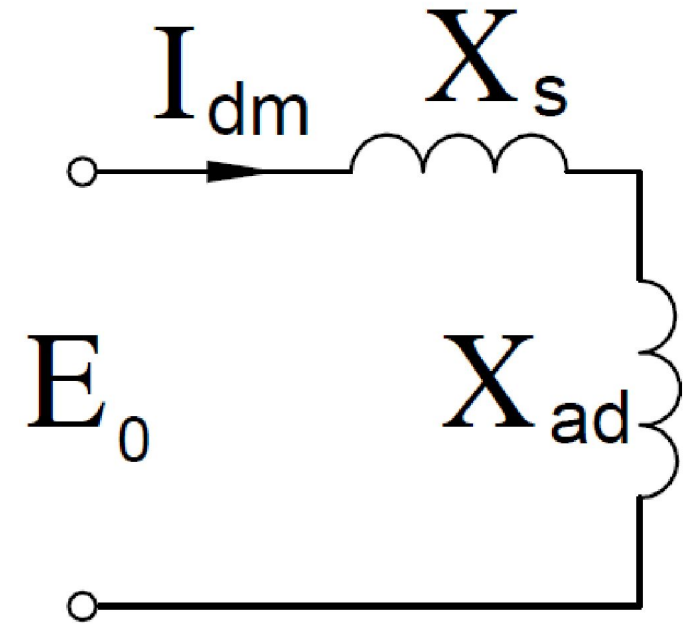


Максимальное значение периодической составляющей переходного тока КЗ (i') определяется:

$$I'_{dm} = \frac{\sqrt{2}E_0}{X'_d}$$

За время $0,5 \dots 1,0$ с происходит затухание свободной составляющей тока в обмотке возбуждения с постоянной времени T'_d .

Поток реакции статора проникнет в железо ротора. ($X_B = \rightarrow \infty$). Начнется установившийся режим КЗ. Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора



$$X_d = X_{ad} + X_s$$

Максимальное значение периодического установившегося тока КЗ равно:

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{2}E_0}{X_d}$$

Апериодическая составляющая тока КЗ будет затухать с постоянной времени T_a , определяемой параметрами обмотки статора.

Уравнение тока КЗ:

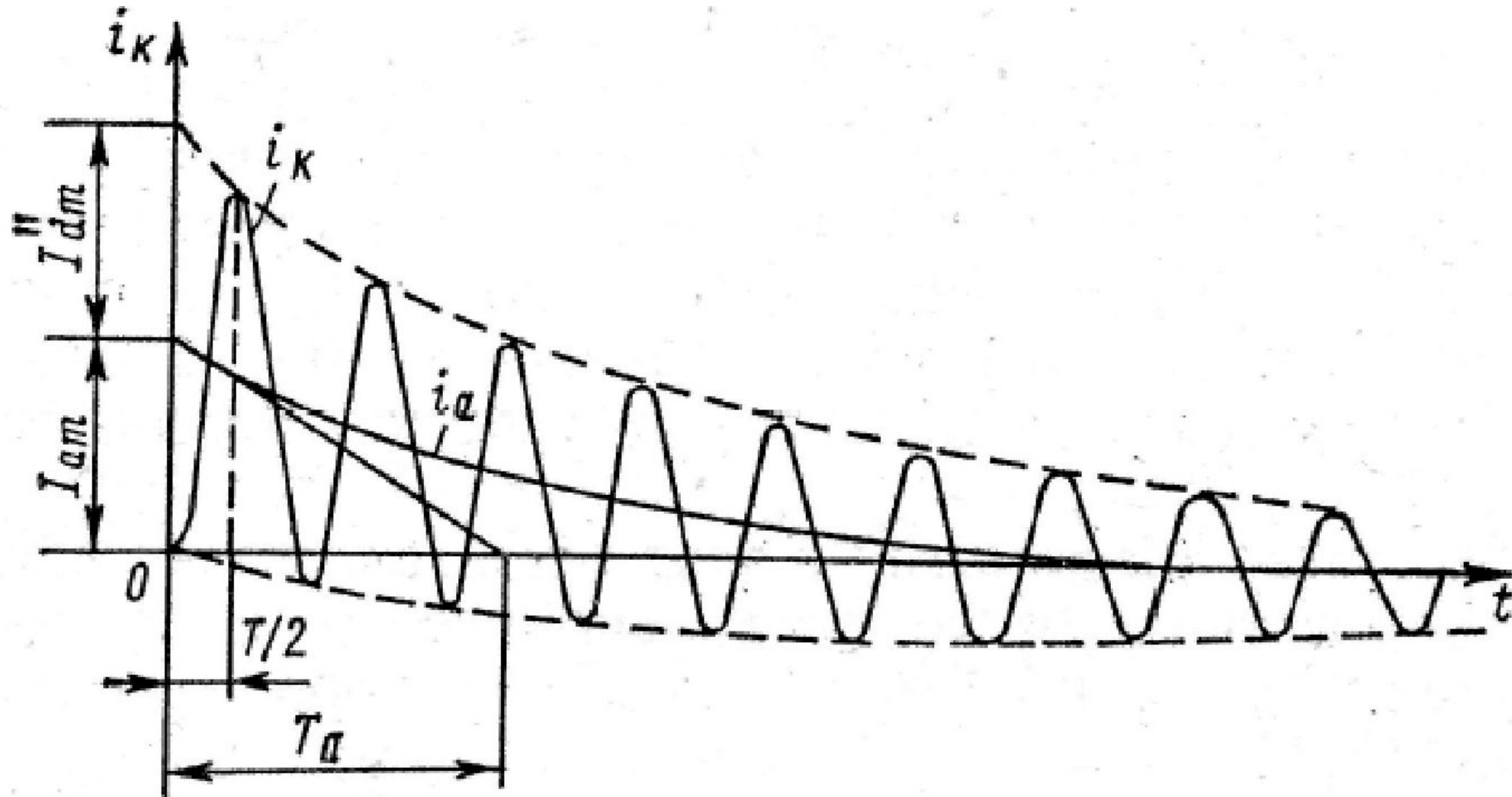
$$\begin{aligned} i_k &= i_n + i_a = i'' + i' + i_y + i_a = \\ &= -(I''_{dm} - I'_{dm})e^{-\frac{t}{T''_d}} \cos \omega t - (I'_{dm} - I_{dm})e^{-\frac{t}{T'_d}} \cos \omega t - I_{dm} \cos \omega t + I_{am}e^{-\frac{t}{T_a}} \end{aligned}$$

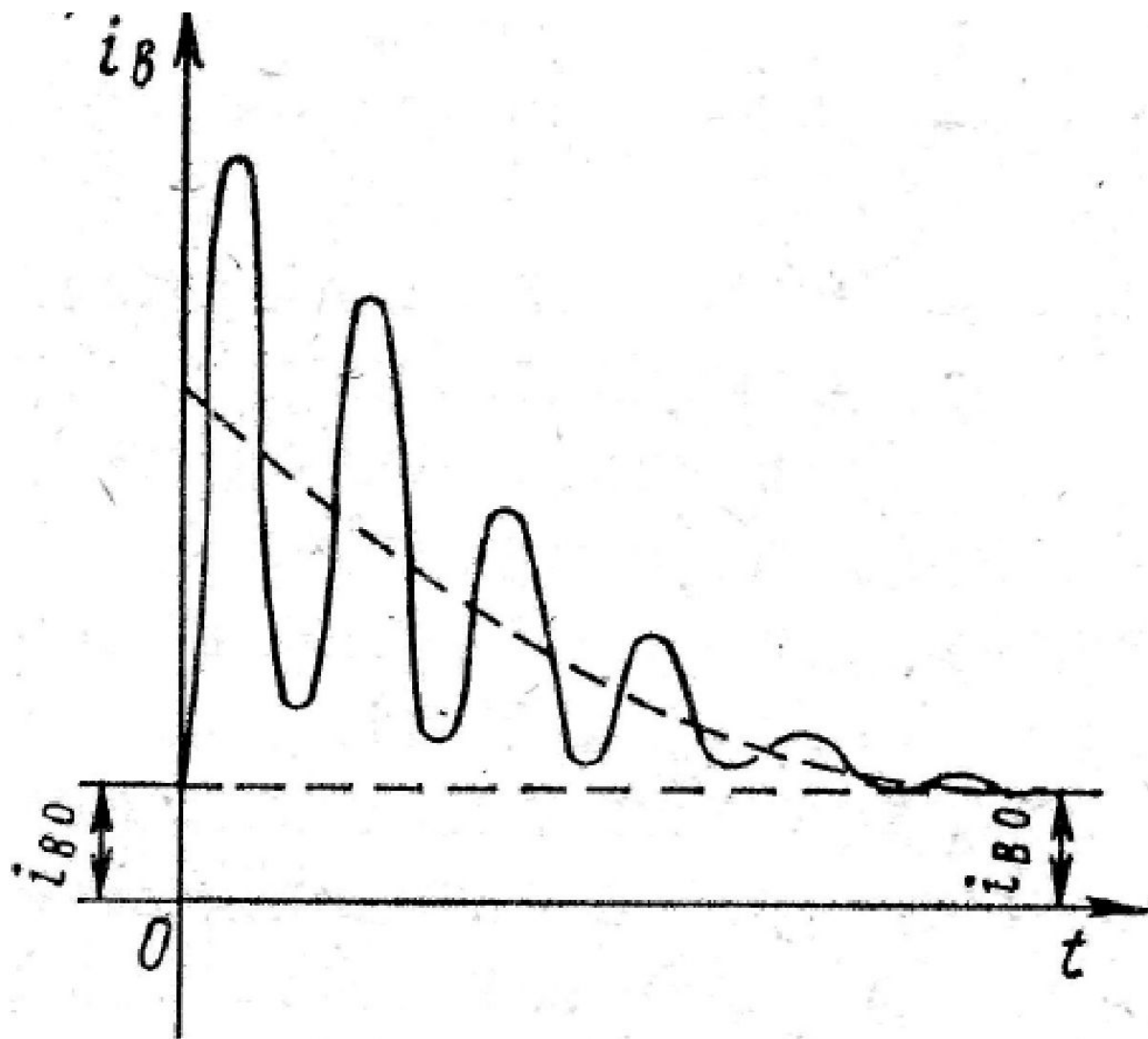
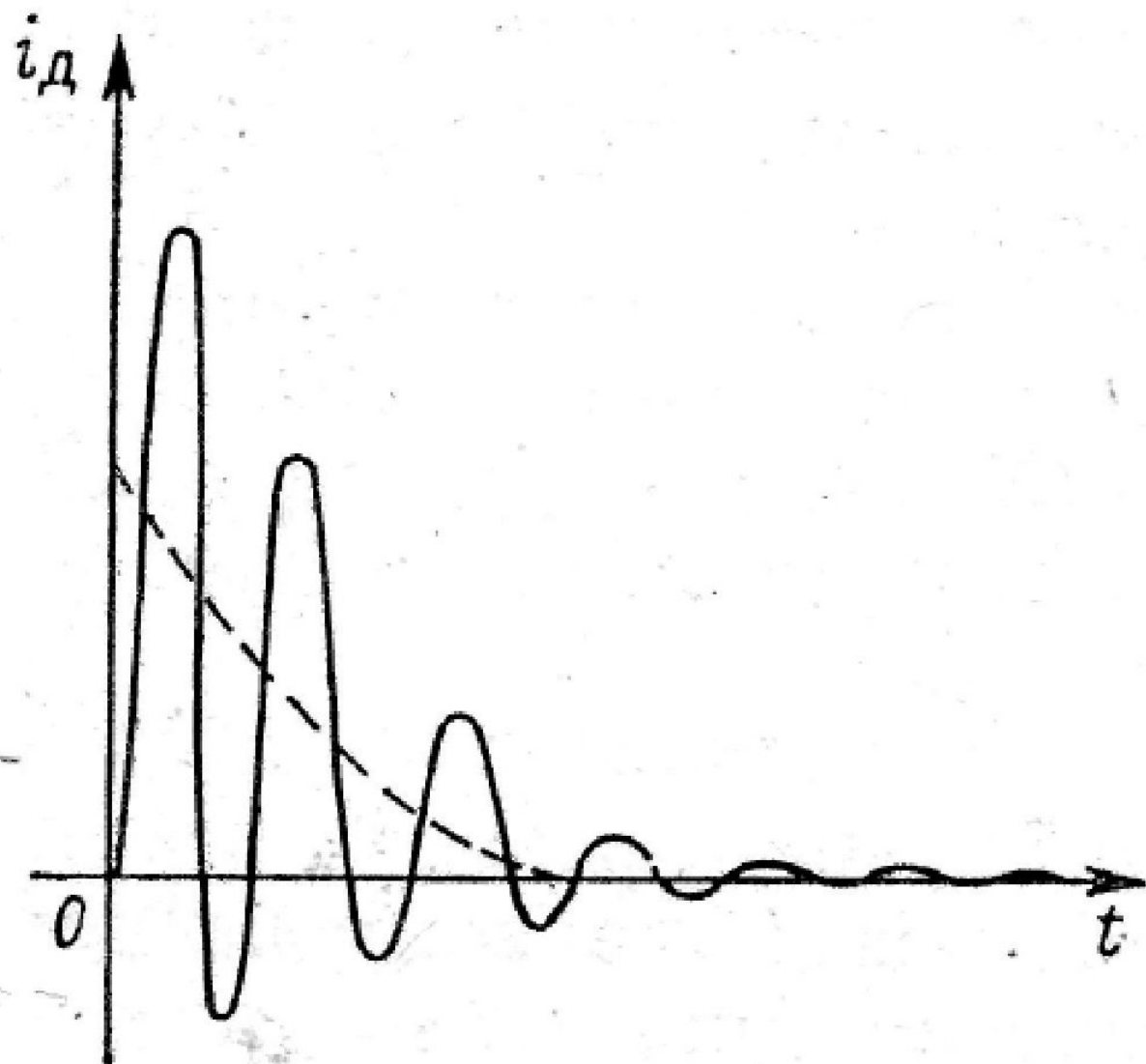
Через $t = \frac{T}{2} \approx 0,01\text{с}$ наблюдается наибольшее значение тока КЗ или **ударный ток КЗ**. С учетом, что $e^{-0} = 1$ получаем:

$$i_k\left(t = \frac{T}{2}\right) = -I''_{dm} + I'_{dm} - I'_{dm} + I_{dm} - I_{dm} + I_{am} = -I''_{dm} + I_{am} = -2I''_{dm}$$

С учетом затухания периодической и аperiodической составляющих ударный ток КЗ равен: $I_{y\partial} = K_{y\partial} \cdot I_{dm}''$

$K_{уд} = 1,8$ – ударный коэффициент, учитывающий затухание тока КЗ.





Короткое замыкание сопровождается снижением напряжения в судовой сети. Работающие электродвигатели, сохраняющие в момент КЗ свое вращение и электродвижущую силу, переходят в генераторный режим работы, подпитывая место КЗ. Ток подпитки со стороны электродвигателей быстро затухает и через 1,5...2,0 периода его величина обычно не превышает их номинальные значения.

В расчетах используют «эквивалентный электродвигатель» мощностью: $P_{эд} = \sum P_{Gi}$; $I''_{эд} = (E_{эд} - U_{ост}) / Z_{эд}$;

$E_{эд} = 0.9 U_{ном}$; $Z''_{эд} = 0.08 + j 0,16$ в относительных единицах

$$i_{уд\ эд} = \sqrt{2} I''_{эд}$$

Ток подпитки от электродвигателей учитывается при расчете ударного тока КЗ, который определяется в результате суммирования ударных токов КЗ со стороны генератор и электродвигателей.

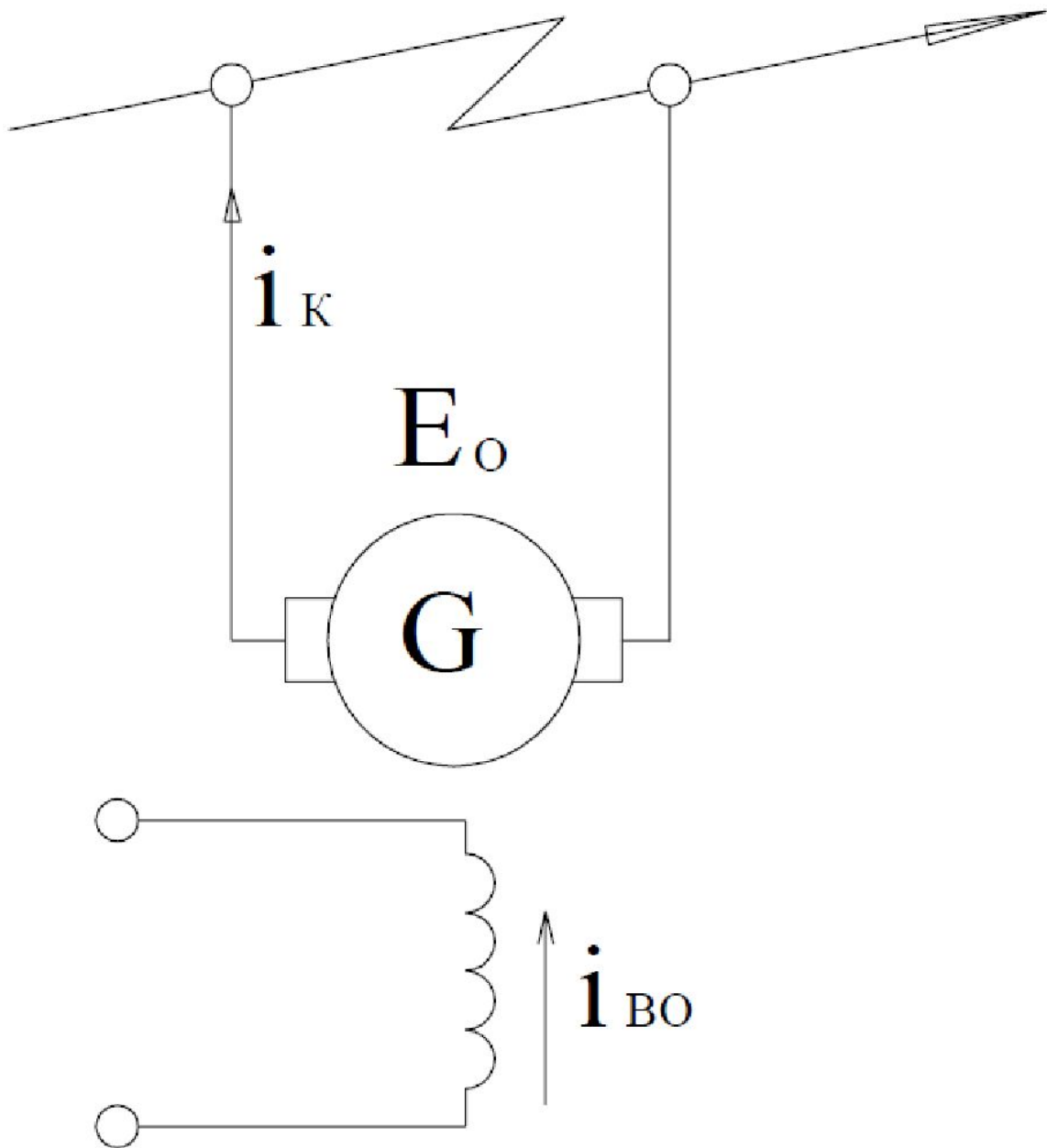
Расчет токов КЗ осуществляется для:

- оценки возможных опасных воздействий токов КЗ на СЭЭУ и ее элементы;
- определения уставок срабатывания устройств защиты;
- выбора оптимальной схемы СЭС;
- проверки на устойчивость коммутационных аппаратов и токопроводов.

Внезапное короткое замыкание генератора постоянного тока вызывает значительный всплеск тока якоря ($8 - 15I_{ном}$ за $t = 0.05$ с.) приводит к:

- появлению опасных механических усилий в обмотках машины;
- появлению значительного тормозящего момента машины и недопустимых механических напряжений скручивания вала и ;
- нарушению коммутации и образование кругового огня;
- нагреву обмоток.

Рассмотрим внезапное короткое замыкание генератора независимого возбуждения при холостом ходе. Предположим, что до короткого замыкания ток возбуждения, магнитный поток и ЭДС генератора равны $i_{в0}$, Φ_0 и E_0 .



В первый момент при внезапном коротком замыкании для цепи якоря можно написать следующее дифференциальное уравнение:

$$E_0 = i_k r_a' + L_a' \frac{di_k}{dt},$$

где r_a' , L_a' - соответственно переходное сопротивление всей якорной цепи и переходная индуктивность в первый момент короткого замыкания.

Сопротивление r_a' выше сопротивления цепи якоря при установившемся режиме r_a .

Возрастание сопротивления в первый момент короткого замыкания объясняется:

- явлением вытеснения тока в проводниках обмоток якорной цепи (скин-эффект);
- возрастанием сопротивления контактного слоя щеток вследствие нарушения коммутации;
- дополнительными потерями, связанными с появлением вихревых токов, и пр.

Переходная индуктивность L_a' ниже индуктивности якорной цепи при установившемся режиме L_a . Индуктивность якорной цепи зависит от магнитной проводимости потоков ее обмоток. В момент короткого замыкания вследствие взаимного противодействия всех полей обмоток и сильного насыщения машины магнитная проводимость потоков обмоток уменьшается, и поэтому $L_a' < L_a$.

Скорость нарастания тока при коротком замыкании определяется переходной постоянной времени цепи якоря:

$$T'_a = \frac{L'_a}{r'_a}$$

Решив исходное дифференциальное уравнение, получим возрастающую составляющую тока короткого замыкания:

$$i_{к1} = I'_{кm} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right),$$

где $I'_{кm} = E_0 / r_a'$ теоретически максимальный ток короткого замыкания в предположении, что $E_0 = const$.

Вследствие размагничивающего действия реакции якоря магнитный поток возбуждения в переходном процессе убывает от значения Φ_0 до установившегося значения Φ_u . Соответственно ему убывает ЭДС якоря от значения E_0 до установившегося значения E_u . Убывание потока и ЭДС в первом приближении можно принять по экспоненциальному закону с переходной постоянной времени цепи возбуждения

$$T'_B = \frac{L'_B}{r'_B}$$

Здесь L'_B и r'_B — переходные индуктивность и сопротивление цепи возбуждения. По тем же причинам, что и для цепи якоря $L'_B < L_B$ и $r'_B > r_B$, где L_B и r_B — индуктивность и сопротивление цепи возбуждения при установившемся режиме.

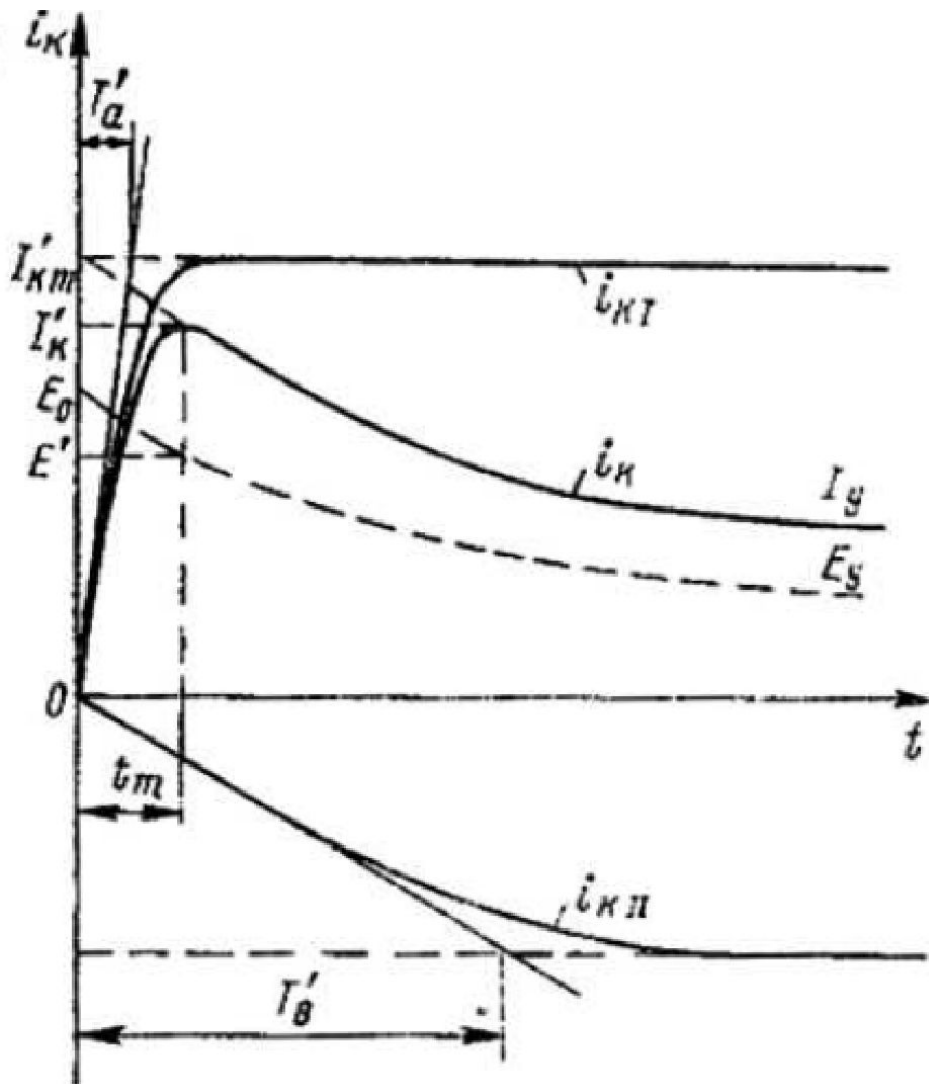
Убывание тока якоря после достижения максимального значения происходит, главным образом, вследствие уменьшения ЭДС. Ток якоря убывает до установившегося значения $I_y = E_y / r_a$

Итак, убывание тока якоря от значения $I'_{км}$ до установившегося значения I_y будет происходить с

переходной постоянной времени T'_B :
$$i_{к11} = (I'_{км} - I_y) \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_B}} \right)$$

Сложив $i_{кI}$ и $i_{кII}$ получим уравнение тока якоря при внезапном коротком замыкании:

$$i_{к} = i_{кI} + i_{кII} = I_{у} - I'_{к\text{т}} e^{-\frac{t}{T_a}} + (I'_{к\text{т}} - I_{у}) e^{-\frac{t}{T_{в}}}$$



Величина всплеска тока якоря практически не зависит от системы возбуждения, а быстрота его затухания в значительной мере определяется ею. У генераторов смешанного возбуждения при согласном включении обмоток возбуждения затухание тока якоря происходит быстрее, а у генератора параллельного возбуждения еще быстрее, чем у генератора независимого возбуждения.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ СЭЭС

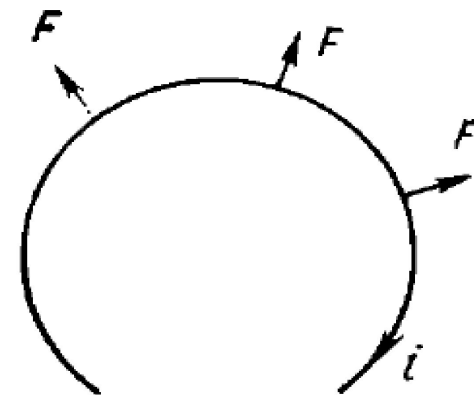
Известно, что при протекании тока в контуре в последнем возникает электродинамическая сила F , стремящаяся деформировать контур.

Для определения силы F воспользуемся законом сохранения энергии:

$$\sum u_i i_i dt = \sum i_i^2 r_i dt + dW_m + F dt$$

В частном случае при неизменном в контурах токов и пренебрегая потерям, силу F определяют

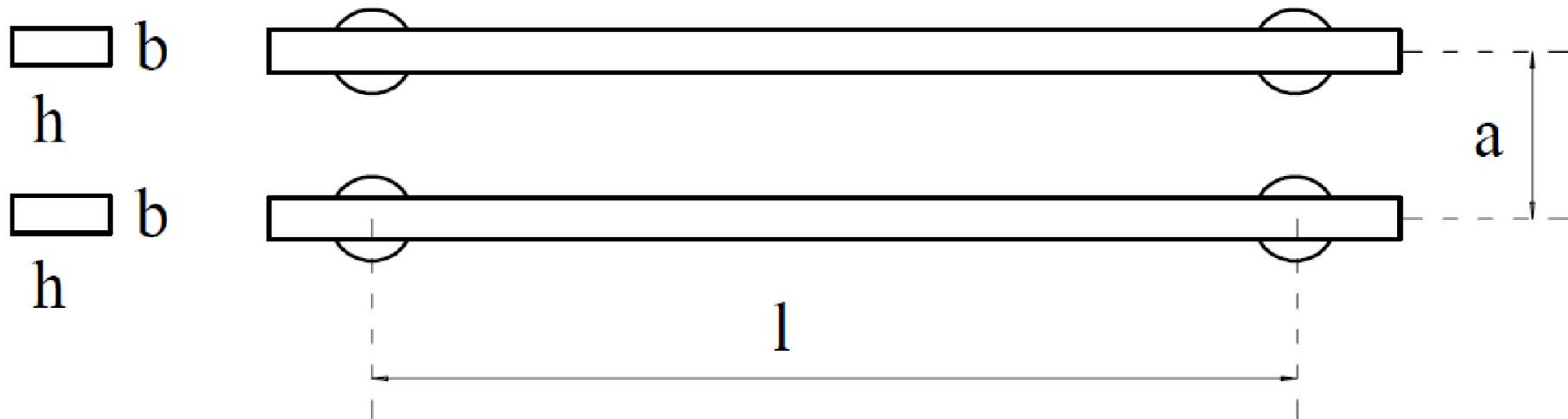
на основе известного уравнения Максвелла, которое показывает, что при постоянном токе i в контуре приращение энергии магнитного поля W_m при деформации контура с током равно работе, совершенной силой F за тот же промежуток времени.



Следовательно: $dW_M = Fdx$ и $F = dW_M/dx$

При взаимодействии двух контуров с индуктивностями L_1 и L_2 , токами i_1 и i_2 энергия магнитного поля определяется:

$$W_M = 1/2 L_1 i_1^2 + 1/2 L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$$



Приращение энергии магнитного поля двух контуров с индуктивностями $L_1 = \text{const}$ и $L_2 = \text{const}$ и соответственно с токами i_1 и i_2 и взаимной индуктивностью M определяется выражением:

$$dW_M = i_1 i_2 dM, \quad \text{следовательно} \quad F = i_1 i_2 dM/dx$$

$$\text{При } l \gg a \quad M = 2 l \cdot (\ln 2l/a - 1) \cdot 10^{-7} \text{ (ГН)}$$

$$dM/dx = dM/da = 2 l/a \cdot 10^{-7}$$

$$\text{Тогда} \quad F = 2 \cdot i_1 i_2 l/a \cdot 10^{-7} \text{ (Н)}$$

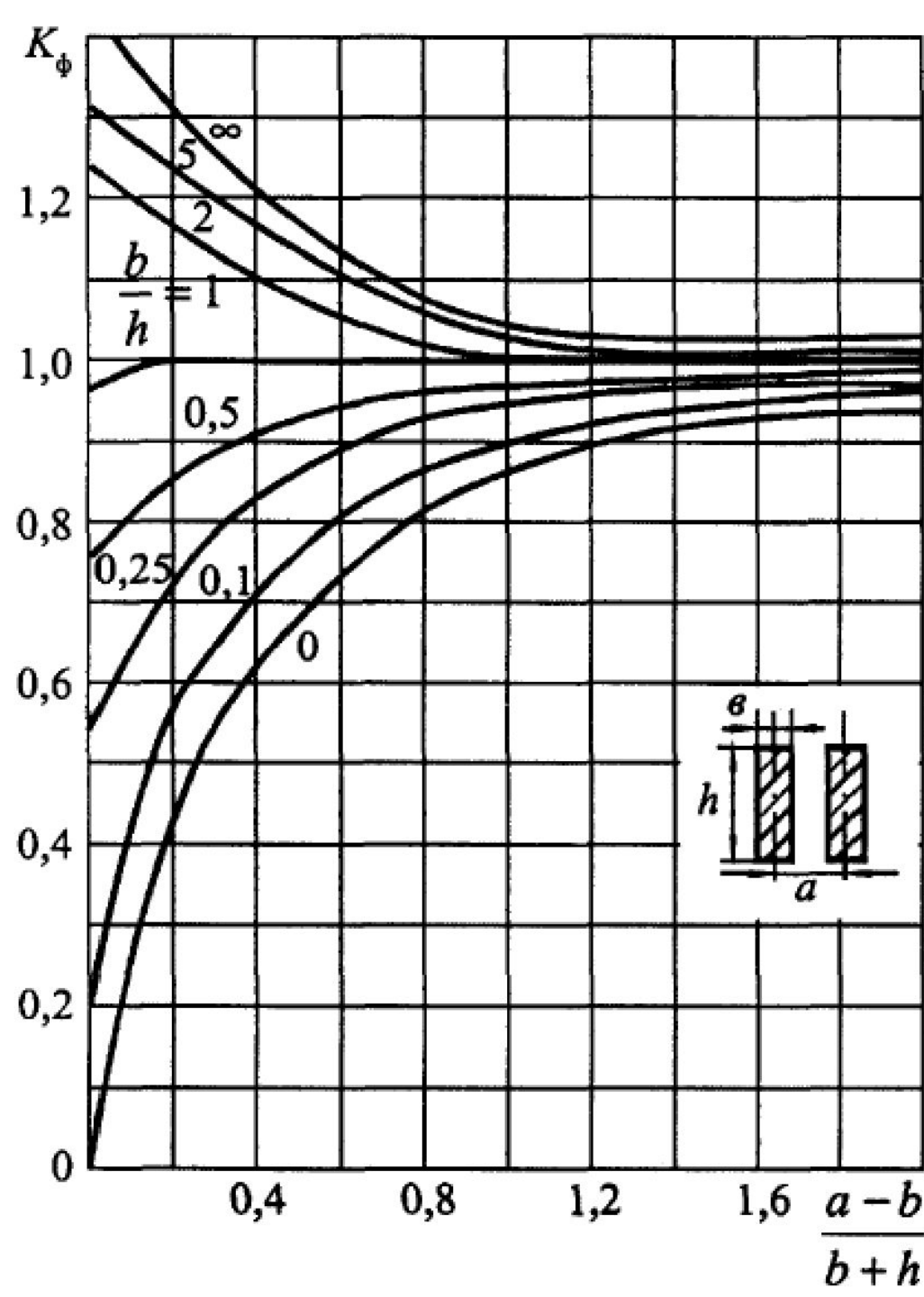
Величина силы F зависит от параметров токопровода b и h

Поэтому в уравнение вводят коэффициент формы k_ϕ

$$F = 2 k_\phi \cdot i_1 i_2 l/a \cdot 10^{-7} \text{ (Н)}$$

Коэффициент формы k_ϕ определяют из расчетных кривых

или из соотношения: если $\frac{a-b}{b+h} > 2$, то $k_\phi = 1$



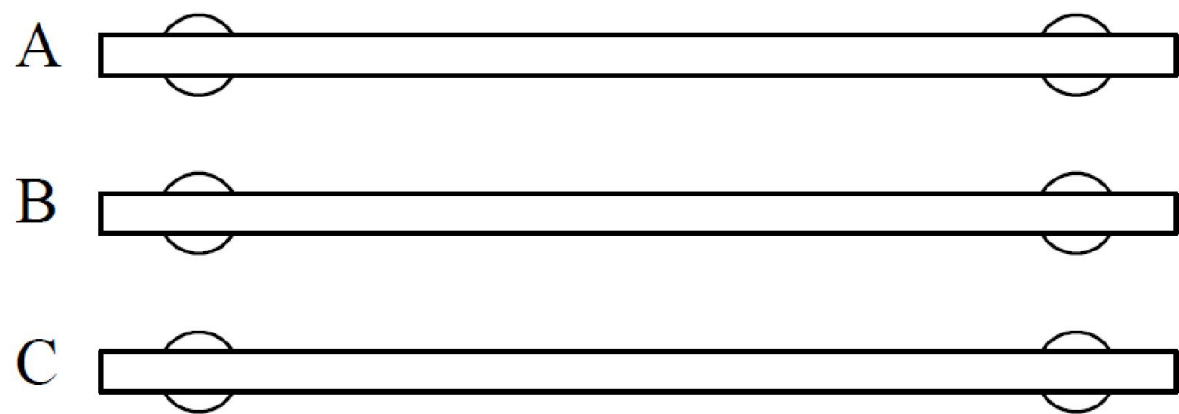
Для максимального тока КЗ (I_{\max})
в СЭЭС постоянного тока

$$F = k_\phi I_{\max}^2 \cdot 1/a \cdot 10^{-7} \text{ (н)}$$

Для однофазного КЗ ($i_1 = i_2$)
в СЭЭС переменного тока

$$F = k_\phi i^2 \cdot 1/a \cdot 10^{-7} \text{ (н)}$$

Для трехфазного КЗ
в СЭЭС переменного тока



Если мгновенные токи в фазах А, В, С обозначить соответственно i_a, i_b, i_c и считать, что начало отсчетов углов совпадает с моментом прохождения тока i_a через нулевое значение, то можно записать:

$$i_a = I_m \sin \omega t; \quad i_b = I_m \sin(\omega t - 2/3\pi); \quad i_c = I_m \sin(\omega t - 4/3\pi).$$

Для шины А:

$$\begin{aligned} F_a &= F_{ab} + F_{ac} = 2(i_a i_b + 0.5 i_a i_c) k_\phi l/a 10^{-7} = \\ &= 2I_m^2 k_\phi \sin \omega t [\sin(\omega t - 2/3\pi) + 0.5 \sin(\omega t - 4/3\pi)] l/a 10^{-7} = \\ &= 2I_m^2 k_\phi l/a f(\omega t) 10^{-7} \text{ (н)} \end{aligned}$$

Сила F_a достигнет максимального значения при $f'(\omega t) = 0$.

После преобразования получаем: $3 \sin 2\omega t + \sqrt{3} \cos 2\omega t = 0$

$$\omega t_{\max} = 5/12\pi; \quad \omega t_{\min} = 11/12\pi$$

$$F_{a \max} = -1.62 I_m^2 k_\phi l/a 10^{-7} \text{ (н)}$$

Для шины В:

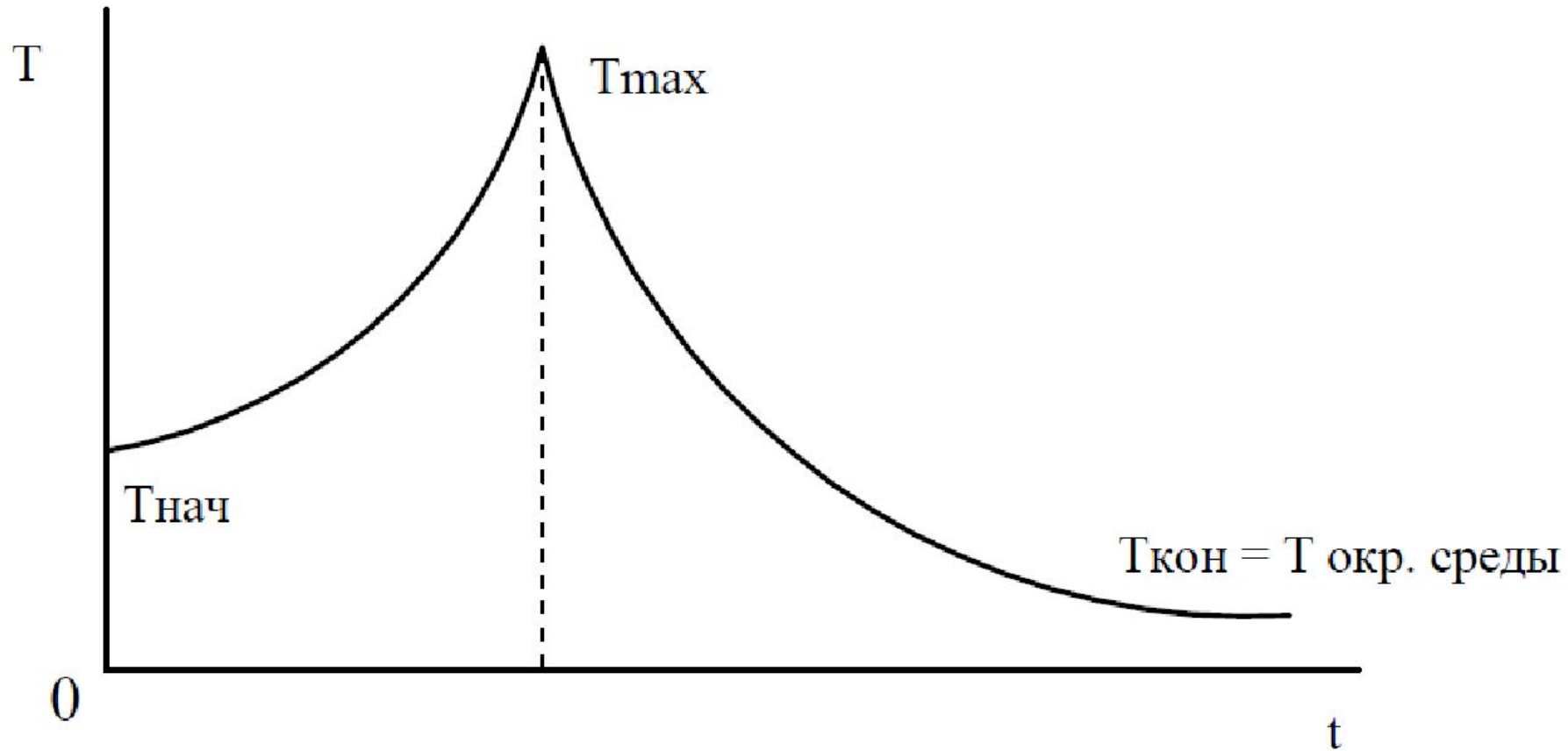
$$\begin{aligned} F_B &= F_{aB} - F_{aC} = 2(i_a i_B - i_B i_C) k_\phi l/a 10^{-7} = \\ &= 2I_m^2 k_\phi \sin(\omega t - 2/3\pi) [\sin\omega t - \sin(\omega t - 4/3\pi)] l/a 10^{-7} = \\ &= 2I_m^2 k_\phi \sin(\omega t - 2/3\pi) [2 \cos(2\omega t - 4/3\pi)/2 \times \sin(\omega t - \omega t + 4/3\pi)/2] l/a 10^{-7} = \\ &= 2 \cdot 0.87 I_m^2 k_\phi 2 \sin(\omega t - 2/3\pi) \times \cos(\omega t - 2/3\pi) l/a 10^{-7} = \\ &= 1.74 I_m^2 k_\phi \sin(2\omega t - 4/3\pi) l/a 10^{-7} \text{ (Н)} \end{aligned}$$

Для $\omega t = 5/12\pi$ и $\omega t = 11/12\pi$ $\sin(2\omega t - 4/3\pi) = +/- 1$

$$F_{B \max} = +/- 1.74 I_m^2 k_\phi l/a 10^{-7} \text{ (Н)}$$

$$F_{B \max} / F_{a \max} = 1.07$$

Термическое действие токов КЗ



Задача теплового расчета:

Определение T_{max} и сравнение его с кратковременно допустимой температурой токопровода.

Пренебрегая отдачей тепла в окружающую среду, т.к. $t_{кз}$ мало принимаем:

$$Q = \int_0^{t_{кз}} I_{кз}^2(t) r dt \quad r = \rho l/S$$
$$Q = mC\Delta T \quad m = S l \gamma$$

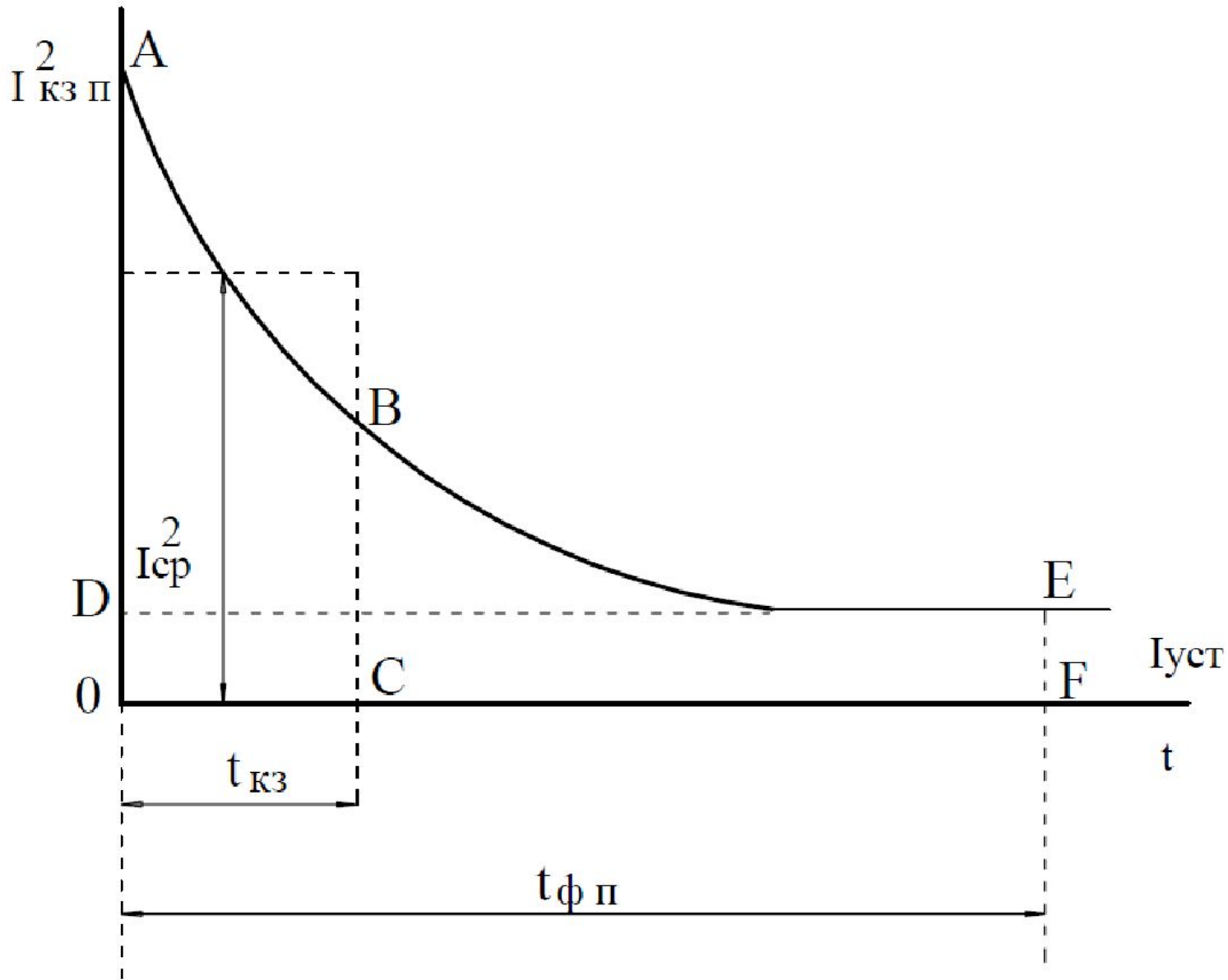
где ρ - удельное сопротивление, C – удельная теплоемкость,
 γ – плотность вещества.

Считая, что ρ и C постоянные величины, получаем:

$$\int_0^{t_{кз}} I_{кз}^2(t) \rho l/S dt = S l \gamma C \Delta T$$
$$\Delta T = [\rho/(S^2 \gamma C)] \int_0^{t_{кз}} I_{кз}^2(t) dt$$

Действующее значение тока КЗ равно:

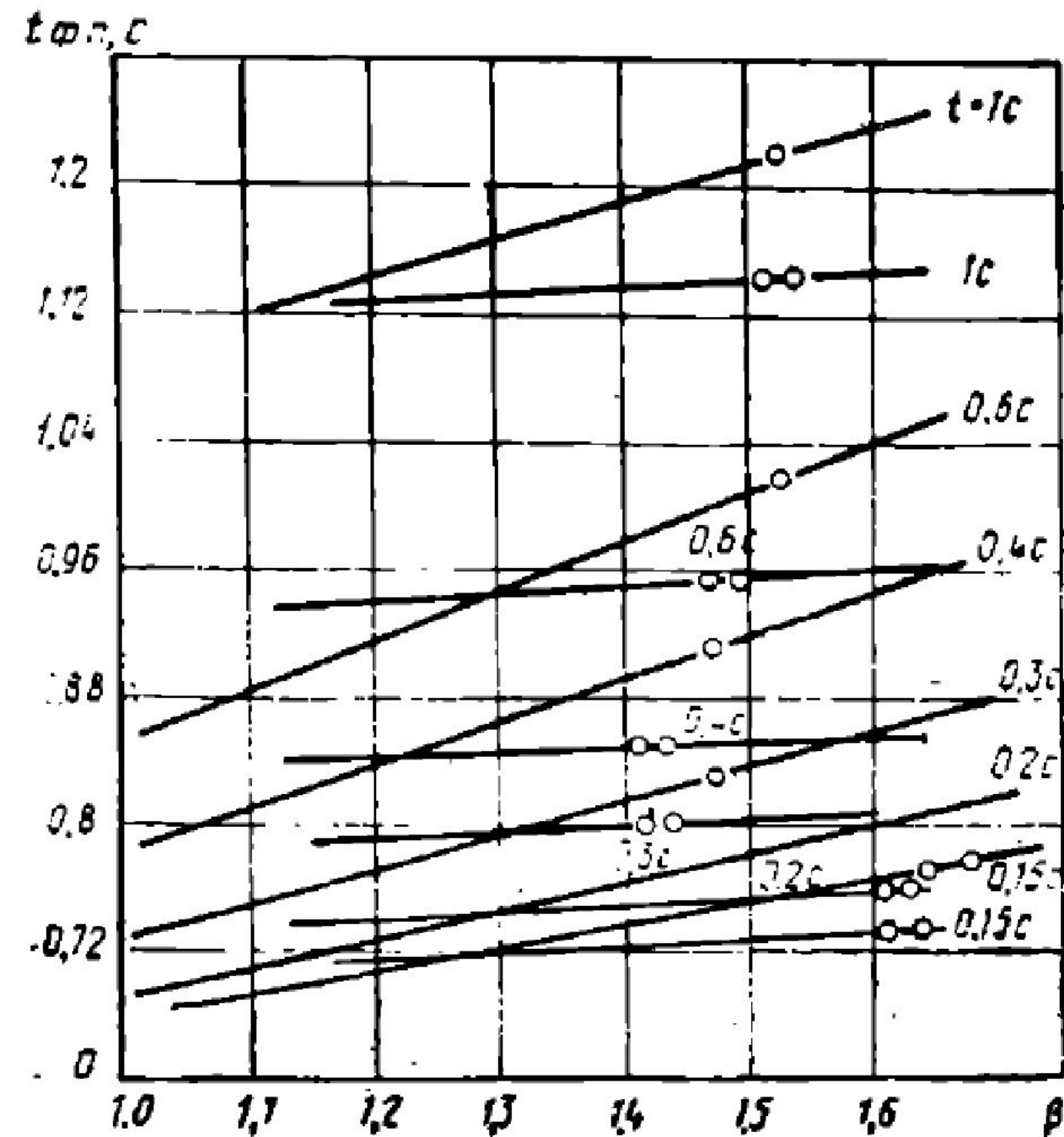
$$I_{кз}^2 = I_{\Pi}^2(t) + I_a^2(t)$$



Выделенное тепло Q пропорционально площади S_{ABCO} .

$$S_{ABCO} = S_{DEFO}$$

т.е. в течении некоторого фиктивного времени ток I_y вызовет тоже выделение тепла, что и периодическая составляющая тока КЗ.



Фиктивное время $t_{фп}$ определяется по расчетным кривым при известном времени короткого замыкания и $\beta = I''/I_y$

Действие апериодической составляющей тока КЗ.

$$i_a = \sqrt{2} I'' e^{-t/T_a}, \quad \text{где } T_a = x''_d / \omega r_a$$

$$\begin{aligned} \int_0^{tk3} i_a^2 dt &= \int_0^{tk3} (\sqrt{2} I'' e^{-t/T_a})^2 dt = \int_0^{tk3} 2 I''^2 e^{-2t/T_a} dt = \\ &= T_a I''^2 (e^{-2x0/T_a} - e^{-2tk3/T_a}) = T_a I''^2 \end{aligned}$$

$$\text{т.к. } \int e^{ax} = 1/a e^{ax}$$

$$e^{-2tk3/T_a} = 0, \quad e^{-2x0/T_a} = 1$$

Аналогично предыдущему, заменяем действие апериодической составляющей тока КЗ на установившееся значение тока КЗ и вводим фиктивное время $t_{\text{ф а}}$.

$$T_a I''^2 = I_y^2 t_{\phi a} \quad t_{\phi a} = T_a (I'' / I_y)^2 = T_a \beta^2$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} \Delta T &= [\rho / (S^2 \gamma C)] \int_0^{t_{k3}} I_{k3}^2(t) dt = \\ &= [\rho / (S^2 \gamma C)] (I_y^2 t_{\phi \Pi} + I_y^2 t_{\phi a}) = \\ &= [\rho / (S^2 \gamma C)] I_y^2 t_{\phi} \end{aligned}$$

$$W_{k3} = \int_0^{t_{k3}} i_{k3}^2(t) dt - \text{тепловой импульс}$$

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

ОСТ5.6181-81 «Судовые электроэнергетические системы. Методы расчета переходных процессов» устанавливает методы расчета основных характеристик переходных процессов, в частности:

- трехфазного металлического короткого замыкания;
- пуска короткозамкнутого асинхронного двигателя прямым включением, через реактор, переключением обмоток статора со звезды на треугольник;
- методы проверки электрооборудования по предельным токам короткого замыкания (к.з.) и т.д.

Расчеты токов к.з. в СЭЭС следует начинать с выбора расчетного режима работы, расчетных точек к.з. и установления величин, которые необходимы для проверки электрооборудования.

Для каждого элемента СЭЭС выбирается режим работы системы, при котором данный элемент находится в наиболее тяжелых условиях при к.з..

Учитывается все генераторы, которые могут работать в параллель одновременно, электромашинные преобразователи, все синхронные и асинхронные электродвигатели, работающие в соответствующих режимах.

В качестве расчетной точки для проверки аппаратов и токопроводов по предельным тока к.з. следует принимать точку, при коротком замыкании в которой в цепи аппарата или проводника будет наибольший ток.

Для проверки аппаратов точка к.з. принимается на его выводах, для проверки шинопроводов и кабелей - в конце проверяемого участка (у генератора, контактора, магнитного пускателя, нижестоящего распределительного щита). Во всех случаях точка к.з. принимается с той стороны аппарата или токопровода, чтобы сквозной ток через аппарат или токопровод был наибольшим. Сопротивление в месте к.з. в расчетах не учитывается.

Расчетным видом к.з. при проверке электрооборудования СЭЭС является трехфазное металлическое к.з.

Порядок расчета токов короткого замыкания.

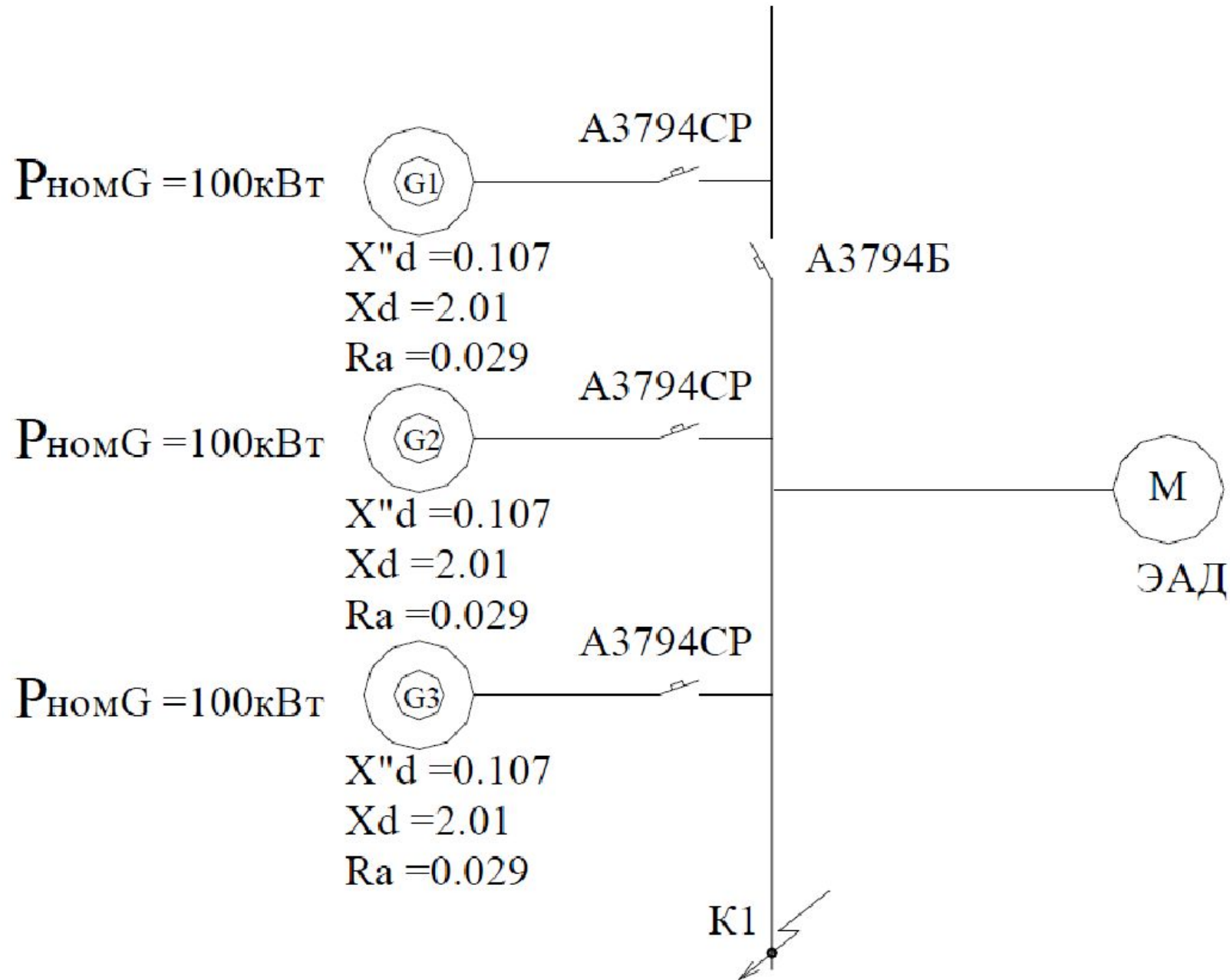
1. Используя схему судовой электростанции(СЭС), получаем расчетную однолинейную схему и выбираем точки к.з.

В расчетную схему включаются:

- источники электроэнергии, работающие в рассматриваемом режиме;
- элементы установки, связывающие источники электроэнергии между собой и с аварийным участком (силовые трансформаторы, реакторы, коммутационно-защитная аппаратура, участки кабельных трасс и шинопроводов);
- синхронные двигатели;
- асинхронная нагрузка в виде одного или нескольких эквивалентных двигателей или отдельных двигателей большой мощности. Эквивалентный двигатель присоединяется непосредственно шинам ГРЩ.

На схему наносят необходимые для расчета технические данные элементов СЭЭС.

Шины ГРЩ



Тип генератора	Мощность, кВт	Сопротивления, о.е.					
		R_a	X''_d	X'_d	X_d	X_g	X''_g
МСК 92-4	100	0,0286	0,176	0,202	2,08	0,885	0,217
МСК 102-4	150	0,0274	0,124	0,186	1,92	0,98	0,135
ГМС 13-26-12	200	0,019	0,12	0,18	1,39	0,6	-
ГМС 13-31-12	250	0,026	0,13	0,20	1,05	0,7	-
ГМС 13-41-12	320	0,029	0,12	0,18	1,2	0,63	-
ГМС 14-29-12	400	0,023	0,13	0,20	1,1	0,60	-
ГМС 14-41-12	500	0,02	0,11	0,17	1,0	0,59	-
МСК 750-1500	600	0,016	0,15	0,236	2,3	1,04	0,163
МСК 1000-1000	800	0,015	0,152	0,24	1,72	0,95	0,18
МСК 1250-1500	1000	0,013	0,15	0,213	1,96	0,91	0,168
МСК 1560-1500	1250	0,011	0,13	0,194	1,97	0,89	0,142
МСК 1875-1500	1500	0,010	0,11	0,176	1,92	0,89	0,125
ТМВ-2-2	2000	0,010	0,137	0,2	1,72	1,72	0,137
ТМВ-3-2	3000	0,011	0,131	0,2	1,94	1,94	0,131

HCM534C

STAMFORD

WINDING 311

	50 Hz			
TELEPHONE INTERFERENCE	THF < 2%			
COOLING AIR	1.035 m ³ /sec 2202 cfm			
VOLTAGE SERIES STAR	380/220	400/231	415/240	440/254
VOLTAGE PARALLEL STAR	190/110	200/115	208/120	220/127
VOLTAGE SERIES DELTA	220/110	230/115	240/120	254/127
KVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES	390	390	390	390
X _d DIR. AXIS SYNCHRONOUS	2.83	2.56	2.37	2.11
X' _d DIR. AXIS TRANSIENT	0.16	0.14	0.13	0.11
X'' _d DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.11	0.10	0.10	0.09
X _q QUAD. AXIS REACTANCE	2.31	2.08	1.93	1.72
X'' _q QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.23	0.21	0.19	0.17
X _L LEAKAGE REACTANCE	0.06	0.05	0.05	0.04
X ₂ NEGATIVE SEQUENCE	0.16	0.15	0.14	0.12
X ₀ ZERO SEQUENCE	0.10	0.09	0.08	0.07

T'd TRANSIENT TIME CONST.	0.08s
T''d SUB-TRANSTIME CONST.	0.012s
T'do O.C. FIELD TIME CONST.	2s
Ta ARMATURE TIME CONST.	0.017s

Активное и индуктивное сопротивления жил трехжильных кабелей при частоте 50 Гц, температуре +65 °С

Сечение, мм ²		1	1,5	2,5	4,0	6,0	10,0	16,0	25,0	35,0	50,0	70,0	95,0	120
R при +65 ⁰ С, Ом/км		21,6	14,4	8,65	5,4	3,6	2,16	1,35	0,86	0,61	0,43	0,30	0,22	0,18
X, Ом/км	КНРП	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,94	0,09
	КНР, КНРЭ	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07
	НРШМ	0,11	0,11	0,10	0,1	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07
R _п , Ом · 10 ⁻³		250	200	100	60	40	25	15	9	6	4,5	3	2	1,8

Контактное сопротивление соединения шина- кабельный наконечник

Сечение кабеля, мм ²	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
Сопротивление, МОм	1,4	0,9	0,71	0,56	0,43	0,32	0,25	0,19	0,16	0,13	0,11	0,09	0,08

Активное сопротивление медной шины прямоугольного сечения при температуре 65⁰С и частоте 50 Гц

S, мм ²		30 x 4	40 x 4	40 x 5	50 x 5	50 x 6	60 x 6	60 x 8	80x10	100x10
R, МОм/м		0,167	0,125	0,100	0,080	0,067	0,056	0,042	0,025	0,020
X при расстоянии между фазами	100 мм	0,163	0,145	0,145	0,137	0,137	0,120	0,120	0,102	0,090
	150 мм	0,189	0,170	0,170	0,157	0,157	0,145	0,145	0,126	0,113
	200 мм	0,206	0,189	0,189	0,180	0,180	0,163	0,163	0,145	0,133

Активное и индуктивное сопротивления универсальных автоматических выключателей

Номинальный ток расцепителя, А		600	1600	2600	5400	400	600	1600	3000	5500
Сопротивление, МОм	активное	0,18	0,04	0,03	0,015	0,15	0,12	0,04	0,22	0,14
	индуктивное	0,3	0,09	0,1	0,07	0,10	0,09	0,09	0,1	0,07

Исходные данные расчета

1. Синхронный генератор НСМ 434С, мощность 365 кВА, напряжение 400 В, номинальный ток 527 А.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси в относительных единицах (о.е.) X''_d	0,12
Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси в относительных единицах (о.е.) X''_d	0,17
Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси в о.е. X_d	2,65
Активное сопротивление фазы статора в о.е. R_a ($T=20^{\circ}\text{C}$)	0,0073
Активное сопротивление фазы статора в о.е. R_a ($T=75^{\circ}\text{C}$)	0,0089
Сверхпереходная постоянная времени генератора T''_d	0,019
Переходная постоянная времени генератора T'_d	0,08
Постоянная времени обмотки статора T_a (с)	0,018

2. Силовые кабели

От ГРЩ до генератора , тип-КНРк, длина-15 м.,
сечение 4(3x95 мм²)

-активное сопротивление одного кабеля

0,227 ом/км

-индуктивное сопротивление одного кабеля

0,075 ом/км

3. Автоматические выключатели QF1, QF2, QF3

Тип Compact NSX 630N

-активное сопротивление

0,00012 ом

-индуктивное сопротивление

0,00009 ом

4. Кабельные наконечники

Сечения кабеля 95 мм²

-активное сопротивление

0,00009 ом

5. Шины.

Сечения шин 50x10 мм, длина 3.0 м

- активное сопротивление

0,000067 ом/м

- индуктивное сопротивление

0,000157 ом/м

Преобразования расчетной схемы могут быть выполнены только в тех случаях, если ее элементы выражены в одинаковых единицах.

Расчеты переходных процессов выполняются в относительных единицах. С этой целью параметры рассматриваемой схемы приводятся к единым базисным условиям.

За базисные величины рекомендуется принимать следующие:
- базисную мощность, равную сумме мощностей генераторов рассматриваемой схемы, питающих точки к.з.,

$$S_{б} = S_{G1} + S_{G2} + \dots + S_{GN} ; \text{кВА};$$

- базисное напряжение, равное номинальному напряжению генераторов

$$U_{б} = U_{ном} \quad \text{В};$$

- базисный ток

$$I_б = S_б / \sqrt{U_б} \quad \text{А};$$

- базисное напряжение

$$Z_б = U_б^2 / S_б = S_б / \sqrt{3} I_б \quad \text{МОм.}$$

При выбранных базисных условиях относительные э.д.с., напряжение, ток, мощности и сопротивления определяются следующим образом:

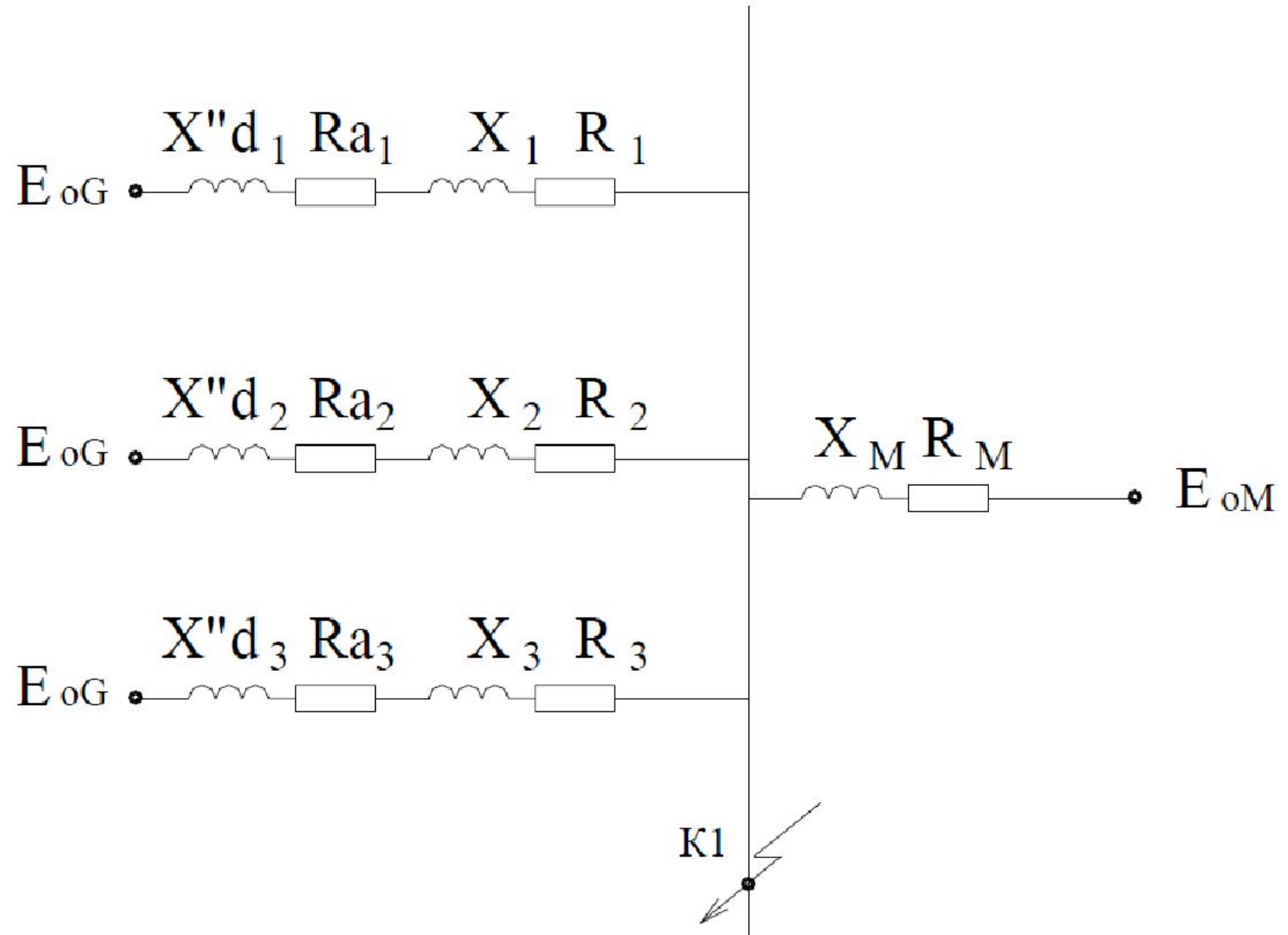
$$E^* = E / U_б, \quad U^* = U / U_б, \quad I^* = I / I_б, \quad S^* = S / S_б; \quad Z^* = Z / Z_б, \\ r^* = r / Z_б, \quad x^* = x / Z_б;$$

Перевод величин из относительных единиц в именованные производится по формулам:

$$E = E^* U_б, \quad U = U^* U_б, \quad I = I^* I_б, \quad S = S^* S_б; \quad Z = Z^* Z_б, \quad r = \\ r^* Z_б, \quad x = x^* Z_б;$$

2. На основании расчетной схемы составляется схема замещения для каждой точки КЗ.

Для этого элементы схемы замещаются активными и индуктивными сопротивлениями. После составления схемы замещения производится ее упрощение.



Для упрощения схемы замещения применяются следующие способы:

- замена последовательно или параллельно включенных сопротивлений одним эквивалентным;
- замена двух или нескольких источников питания одним эквивалентным;
- преобразование к лучевой схеме.