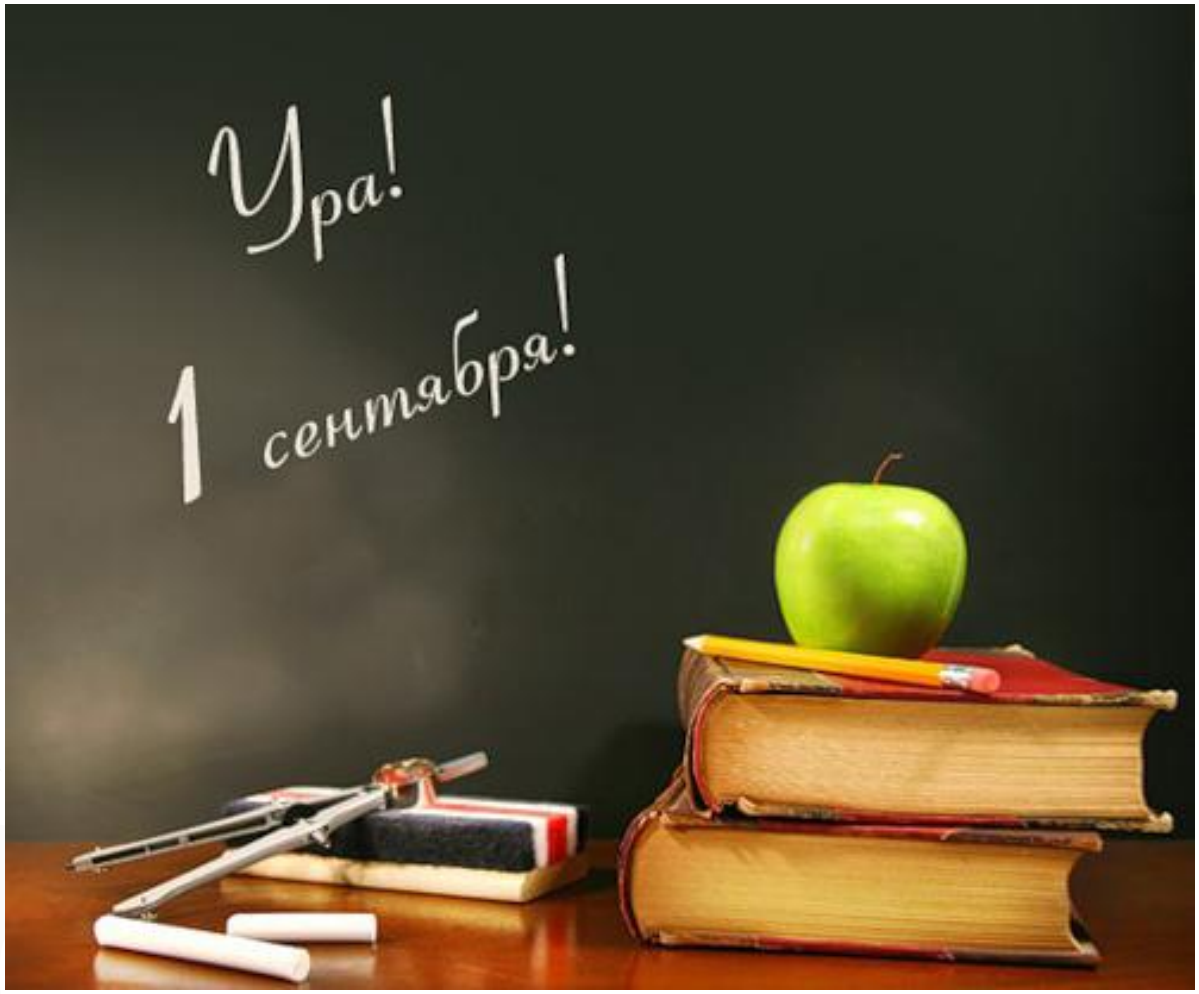
БРС-структура КП для ввода в БАРС

Трудоемкость КП = 2 з.е.

Разделы КП	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ –1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	8	11	14	
Р1 Проектирование электрической сети 35-110 кВ промышленного района		+			
Р2 Определение параметров установившихся режимов электрических сетей			+		
Р3 Оформление материалов курсового проекта				+	
Р4 Защита курсового проекта					+
Вес КМ:		40	30	10	20

В приложение к диплому выносится оценка промежуточной аттестации по КП за 7 семестр, полученная на основании семестровой составляющей и защиты КП

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ


Ура!
1 сентября!

ОПЯТЬ
В ШКОЛУУУУ!!

«ДЛЯ УНИЧТОЖЕНИЯ НАЦИИ НЕ НУЖНЫ АТОМНЫЕ БОМБЫ ИЛИ РАКЕТЫ ДАЛЬНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ.
ДОСТАТОЧНО СНИЗИТЬ **КАЧЕСТВО ОБРАЗОВАНИЯ** И РАЗРЕШИТЬ СПИСЫВАТЬ НА ЭКЗАМЕНАХ.
ПАЦИЕНТЫ УМИРАЮТ ОТ РУК ТАКИХ ВРАЧЕЙ.
ЗДАНИЯ РУШАТСЯ ОТ РУК ТАКИХ ИНЖЕНЕРОВ.
ДЕНЬГИ ПРОПАДАЮТ ИЗ-ЗА ТАКИХ ЭКОНОМИСТОВ И БУХГАЛТЕРОВ.
СПРАВЕДЛИВОСТЬ ИСЧЕЗАЕТ ИЗ-ЗА ТАКИХ ЮРИСТОВ И СУДЕЙ.
КРАХ ОБРАЗОВАНИЯ – ЭТО КРАХ НАЦИИ».

БАРС-структура дисциплины для ввода в БАРС ЗЕТ = __5_
В приложение к диплому выносится **оценка за освоение дисциплины** за 7 семестр.

Раздел	Веса контрольных мероприятий, %					
	Индекс КМ:	КМ –1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5
	Срок КМ:	3 нед.	8 нед.	11 нед.	14 нед.	15 нед
Р1 Параметры схем замещения для расчетов электромагнитных и электромеханических переходных процессов		+		+		+
Р2 Трехфазные короткие замыкания. Несимметричные режимы			+	+		+
Р3 Расчеты устойчивости простейших систем					+	+
Вес КМ:		20 %	20 %	20 %	20 %	20%

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

7.1 Основная литература:

1. Крючков И.П., Старшинов В.А., Гусев М.В. Переходные процессы в электроэнергетических системах. М.: Изд. дом МЭИ, 2008.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520с
3. Буре И.Г., Родина Л.С. Расчет параметров систем промышленного электроснабжения в переходных режимах. М.: Издательство МЭИ, 2005.

Электромагнитные переходные процессы

Токи коротких замыканий

Токи коротких замыканий

Коротким замыканием называют всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в системах с заземленными нейтралями (или четырехпроводных) — также замыкание одной или нескольких фаз на землю (или на нулевой провод).

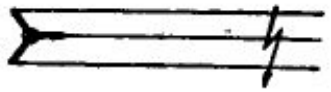
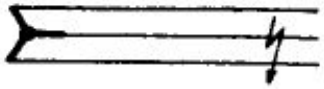
В системах с незаземленными нейтралями или с нейтралями, заземленными через специальные компенсирующие устройства, замыкание одной из фаз на землю называют простым замыканием. При этом виде повреждения прохождение тока обусловлено главным образом емкостью фаз относительно земли.

Токи коротких замыканий

При возникновении короткого замыкания в электрической системе сопротивление цепи уменьшается (степень уменьшения зависит от положения точки короткого замыкания в системе), что приводит к увеличению токов в отдельных ветвях системы по сравнению с токами нормального режима. В свою очередь это вызывает снижение напряжений в системе, которое особенно велико вблизи места короткого замыкания.

Токи коротких замыканий

Относнтельная вероятность и сокращенные обозначения основных видов короткого замыкания

Виды короткого замыкания	Принципиальная схема	Буквенное обозначение на схемах места н вида короткого замыкания	Относительная вероятность короткого замыкания, %
Трехфазное		$K^{(3)}$	5
Двухфазное		$K^{(2)}$	10
Однофазное		$K^{(1)}$	65
Двухфазное ia зем-лю		$K^{(1,1)}$	20

Токи коротких замыканий

Под расчетом электромагнитного переходного процесса обычно понимают вычисление токов и напряжений в рассматриваемой схеме при заданных условиях. В зависимости от назначения такого расчета находят указанные величины для заданного момента времени или находят их изменения в течение всего переходного процесса. При этом решение обычно проводится для одной или нескольких ветвей и точек схемы.

Особенностью расчетов при решении задач, встречающихся в эксплуатации, является необходимость учета конкретных условий рассматриваемого переходного процесса. Напротив, при проектировании часто довольствуются приближенными данными. Поэтому в первом случае требуется большая точность.

Так, например, благодаря тому, что интервалы между параметрами, характеризующими различные типы аппаратов в отношении их устойчивости при коротких замыканиях, достаточно большие, точность расчета для выбора таких аппаратов может быть невелика. Напротив, точность расчета для целей релейной защиты и автоматизации обычно должна быть значительно выше.

Токи коротких замыканий

- Основные допущения
- 1) отсутствие насыщения магнитных систем;
- 2) пренебрежение токами намагничивания трансформаторов;
- 3) сохранение симметрии трехфазной системы;
- 4) пренебрежение емкостными проводимостями;
- 5) приближенный учет нагрузок;
- 6) неучет активных сопротивлений при расчете периодической слагающей тока КЗ;
- 7) отсутствие качаний синхронных машин.

- Система относительных единиц
- Под относительным значением какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения

$$S_б = \sqrt{3} U_б I_б$$

$$z_б = \frac{U_б}{\sqrt{3} I_б}$$

Токи коротких замыканий

$$E_{*(б)} = E/U_б;$$

$$U_{*(б)} = U/U_б;$$

$$I_{*(б)} = I/I_б;$$

$$S_{*(б)} = S/S_б;$$

$$z_{*(б)} = z/z_б,$$

$$z_{*(б)} = \frac{z}{z_б} = \frac{\sqrt{3}\, I_б z}{U_б}$$

$$z_{*(б)} = z\,\frac{S_б}{U_б^2}$$

Токи коротких замыканий

- Если сопротивления элементов заданы в относительных номинальных единицах (о.н.е.), они определяются по тем же формулам, только в качестве базисных величин приняты номинальные

$$z_{*(\text{н})} = \frac{\sqrt{3}\, I_{\text{н}} z}{U_{\text{н}}}$$

$$z_{*(\text{н})} = z \frac{S_{\text{н}}}{U_{\text{н}}^2}$$

- Иногда относительные величины сопротивлений выражают в процентах

$$z_{\%} = 100 z$$

Токи коротких замыканий

- Пересчет к базисным условиям ЭДС и сопротивлений элементов схемы, заданных в о.н.е. производится по следующим соотношениям

$$E_{*(б)} = E_{*(н)} \frac{U_н}{U_б};$$

$$z_{*(б)} = z_{*(н)} \frac{I_б}{I_н} \frac{U_н}{U_б}$$

$$z_{*(б)} = z_{*(н)} \frac{S_б}{S_н} \frac{U_н^2}{U_б^2}$$

При выборе базисных условий следует руководствоваться соображениями, чтобы вычислительная работа была по возможности проще и порядок числовых значений относительных базисных величин был достаточно удобен для оперирования с ними. Для базисной мощности $S_б$ целесообразно принимать простое круглое число (1000 *Мва*, 100 *Мва* и т. п.), а иногда часто повторяющуюся в заданной схеме номинальную мощность (или кратную ей). За $U_б$ рекомендуется принимать $U_н$ или близкое к нему. При $U_б = U_н$ пересчет относительных э. д. с. вообще отпадает ($\underset{*}{E}_{(б)} = \underset{*}{E}_{(н)}$), а выражения для пересчета относительных сопротивлений принимают более простой вид:

$$\underset{*}{z}_{(б)} = \underset{*}{z}_{(н)} \frac{I_б}{I_н}$$

$$\underset{*}{z}_{(б)} = \underset{*}{z}_{(н)} \frac{S_б}{S_н}$$

Токи коротких замыканий

$$\omega_{б} = \omega_{с}$$

$$\underset{*}{\omega}_{(б)} = \frac{\omega}{\omega_{б}} = \frac{\omega}{\omega_{с}}$$

$$L_{б} = \frac{z_{б}}{\omega_{б}} = \frac{z_{б}}{\omega_{с}}$$

$$\Psi_{б} = \frac{U_{б}}{\omega_{б}} = \frac{U_{б}}{\omega_{с}}$$

$$\underset{*}{x}_{(б)} = \omega_{с} \underset{*}{L}_{(б)} = \underset{*}{L}_{(б)};$$

$$\underset{*}{\Psi}_{(б)} = \underset{*}{I}_{(б)} \underset{*}{L}_{(б)} = \underset{*}{I}_{(б)} \underset{*}{x}_{(б)};$$

$$\underset{*}{E}_{(б)} = \omega_{с} \underset{*}{\Psi}_{(б)} = \underset{*}{\Psi}_{(б)};$$

Токи коротких замыканий

$$t_б = 1/\omega_c$$

$$t_б = 1/314 \ сек$$

$$t_{*(б)} = \frac{t}{t_б} = \omega_c t$$

$$t_{*(б)} = 314t$$

$$T = \frac{L}{r} = \frac{x}{\omega_c r} = \frac{x_{*(б)}}{\omega_c r_{*(б)}}$$

$$T_* = \omega_c T = \omega_c \frac{L}{r} = \frac{x}{r} = \frac{x_{*(б)}}{r_{*(б)}}$$

Токи коротких замыканий

При составлении расчетной схемы замещения целесообразно одновременно с приведением параметров к базисным условиям осуществить приведение к одной ступени трансформации, выбранной за основную. Можно записать общие выражения для определения приведенных к основной ступени значений отдельных величин

$$\mathring{E} = (k_1 k_2 \ldots k_n) E;$$

$$\mathring{U} = (k_1 k_2 \ldots k_n) U;$$

$$\mathring{I} = \frac{1}{(k_1 k_2 \ldots k_n)} I;$$

$$\mathring{z} = (k_1 k_2 \ldots k_n)^2 z,$$

Токи коротких замыканий

- Для упрощения расчетов используют приближенное приведение, когда коэффициенты трансформации определяются по средним номинальным напряжениям

$$\dot{E} = \frac{U_{ср.б}}{U_{ср}} E;$$

$$\dot{U} = \frac{U_{ср.б}}{U_{ср}} U;$$

$$\dot{I} = \frac{U_{ср}}{U_{ср.б}} I;$$

$$\dot{z} = \left(\frac{U_{ср.б}}{U_{ср}}\right)^2 z,$$

где $U_{ср}$ — среднее номинальное напряжение ступени, с которой производится пересчет;

$U_{ср.б}$ — то же выбранной основной ступени.

Токи коротких замыканий

Выражение сопротивлений элементов схемы замещения в относительных базисных единицах (о.б.е.) с учетом приведения к одной ступени напряжения

1. Генератор Для получения сопротивления в о.б.е. пользуются паспортными параметрами (номинальный ток или мощность, номинальное напряжение, сопротивление в о.н.е или в %). Тогда сопротивление генератора в именованных единицах

$$X_{г(Ом)} = X_{г*(н)} \cdot X_{г(ном)} = X_{г*(н)} \cdot \frac{U_н^2}{S_н}$$

А в о.б.е.

$$X_{г*(б)} = \frac{X_{г(Ом)}}{X_б} \cdot К_т^2 = \frac{X_{г*(н)} \cdot S_б \cdot U_н^2}{S_н \cdot U_б^2} \cdot К_т^2$$

Зная, что $К_т = \frac{U_б}{U_н}$, получим $X_{г*(б)} = \frac{X_{г*(н)} \cdot S_б}{S_н}$

Токи коротких замыканий

Выражение сопротивлен[illegible]ентов схемы замещения в относительных базисных единицах (о.б.е.) с учетом приведения к одной ступени напряжения

1. Генератор Для получения сопротивления в о.б.е. пользуются паспортными параметрами (номинальный ток или мощность, номинальное напряжение, сопротивление в о.н.е или в %). Тогда сопротивление генератора в именованных единицах

$$X_{г(Ом)} = X_{г*(н)} \cdot X_{г(ном)} = X_{г*(н)} \cdot \frac{U_н^2}{S_н}$$

А в о.б.е.

$$X_{г*(б)} = \frac{X_{г(Ом)}}{X_б} \cdot К_т^2 = \frac{X_{г*(н)} \cdot S_б \cdot U_н^2}{S_н \cdot U_б^2} \cdot К_т^2$$

Зная, что $К_т = \frac{U_б}{U_н}$, получим $X_{г*(б)} = \frac{X_{г*(н)} \cdot S_б}{S_н}$

Токи коротких замыканий

Выражение сог[illegible]ений элементов схемы замещения в относительных базисных единицах (о.б.е.) с учетом приведения к одной ступени напряжения

1. Генератор Для получения сопротивления в о.б.е. пользуются паспортными параметрами (номинальный ток или мощность, номинальное напряжение, сопротивление в о.н.е или в %). Тогда сопротивление генератора в именованных единицах

$$X_{г(Ом)} = X_{г*(н)} \cdot X_{г(ном)} = X_{г*(н)} \cdot \frac{U_н^2}{S_н}$$

А в о.б.е.

$$X_{г*(б)} = \frac{X_{г(Ом)}}{X_б} \cdot К_т^2 = \frac{X_{г*(н)} \cdot S_б \cdot U_н^2}{S_н \cdot U_б^2} \cdot К_т^2$$

Зная, что $К_т = \frac{U_б}{U_н}$, получим $X_{г*(б)} = \frac{X_{г*(н)} \cdot S_б}{S_н}$

Токи коротких замыканий

Преобразование схем замещения

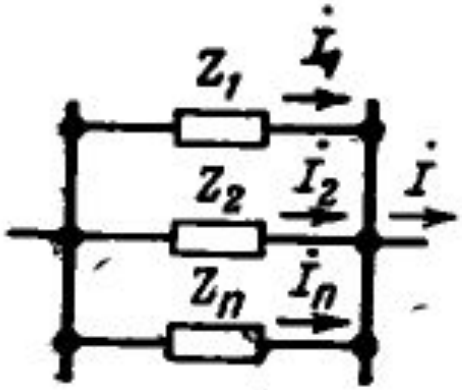
Для расчета тока в месте КЗ схему замещения необходимо привести к простейшему виду – ЭДС за реактивностью, непосредственно связанные с точкой КЗ, путем элементарных преобразований или используя более сложные методы и принципы.

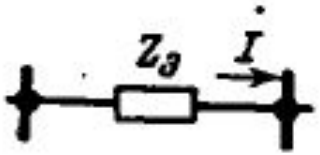
1. Последовательное соединение сопротивлений

$$Z_э = Z_1 + Z_2 + \ldots + Z_n$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \ldots = \dot{I}_n$$

2. Параллельное соединение сопротивлений





$$Z_э = \frac{1}{Y_э},$$

где

$$Y_э = Y_1 + Y_2 + \ldots + Y_n;$$

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1};\quad Y_2 = \frac{1}{Z_2};\ \ldots$$

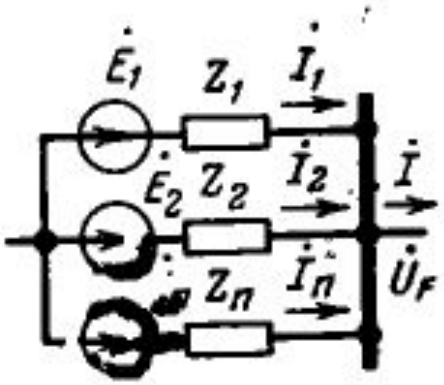
$$Y_n = \frac{1}{Z_n}$$

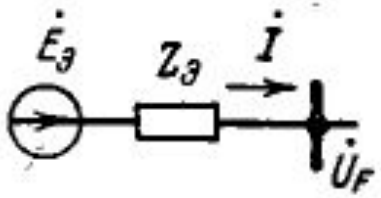
$$\dot{I}_n = \frac{Z_э}{Z_n}\dot{I}$$

При двух ветвях

$$Z_э = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

3. Замена нескольких источников эквивалентным





$$\dot{E}_э = \frac{1}{Y_э} \sum_{k=1}^{n} Y_k \dot{E}$$

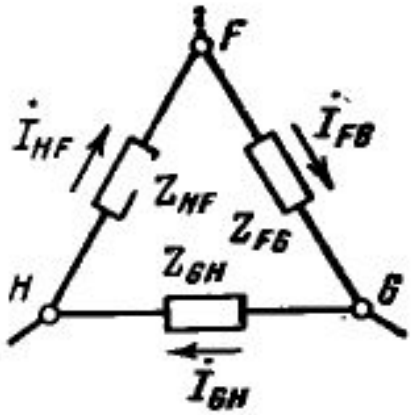
$$\dot{I}_n = \frac{\dot{E}_n - \dot{U}_F}{Z_n}$$

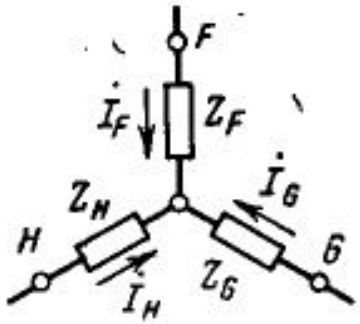
$Y_1, Y_2, \ldots, Y_n, Z_э$ — см. п. 2

При двух ветвях

$$\dot{E}_э = \frac{\dot{E}_1 Z_2 + \dot{E}_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

4. Преобразование треугольника в звезду





$$z_F = \frac{z_{FG} z_{HF}}{z_{FG} + z_{GH} + z_{HF}}$$

$$z_G = \frac{z_{FG} z_{GH}}{z_{FG} + z_{GH} + z_{HF}}$$

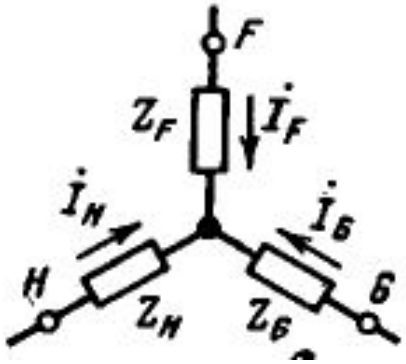
$$z_H = \frac{z_{GH} z_{HF}}{z_{FG} + z_{GH} + z_{HF}}$$

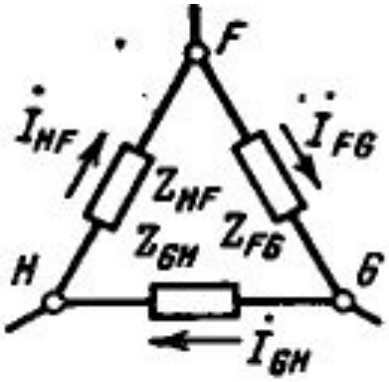
$$\dot{I}_{FG} = \frac{\dot{I}_F z_F - \dot{I}_G z_G}{z_{FG}}$$

$$\dot{I}_{GH} = \frac{\dot{I}_G z_G - \dot{I}_H z_H}{z_{GH}}$$

$$\dot{I}_{HF} = \frac{\dot{I}_H z_H - \dot{I}_F z_F}{z_{HF}}$$

5. Преобразование звезды в треугольник





$$Z_{FG} = Z_F + Z_G + \frac{Z_F Z_G}{Z_H}$$

$$Z_{GH} = Z_G + Z_H + \frac{Z_G Z_H}{Z_F}$$

$$Z_{HF} = Z_H + Z_F + \frac{Z_H Z_F}{Z_G}$$

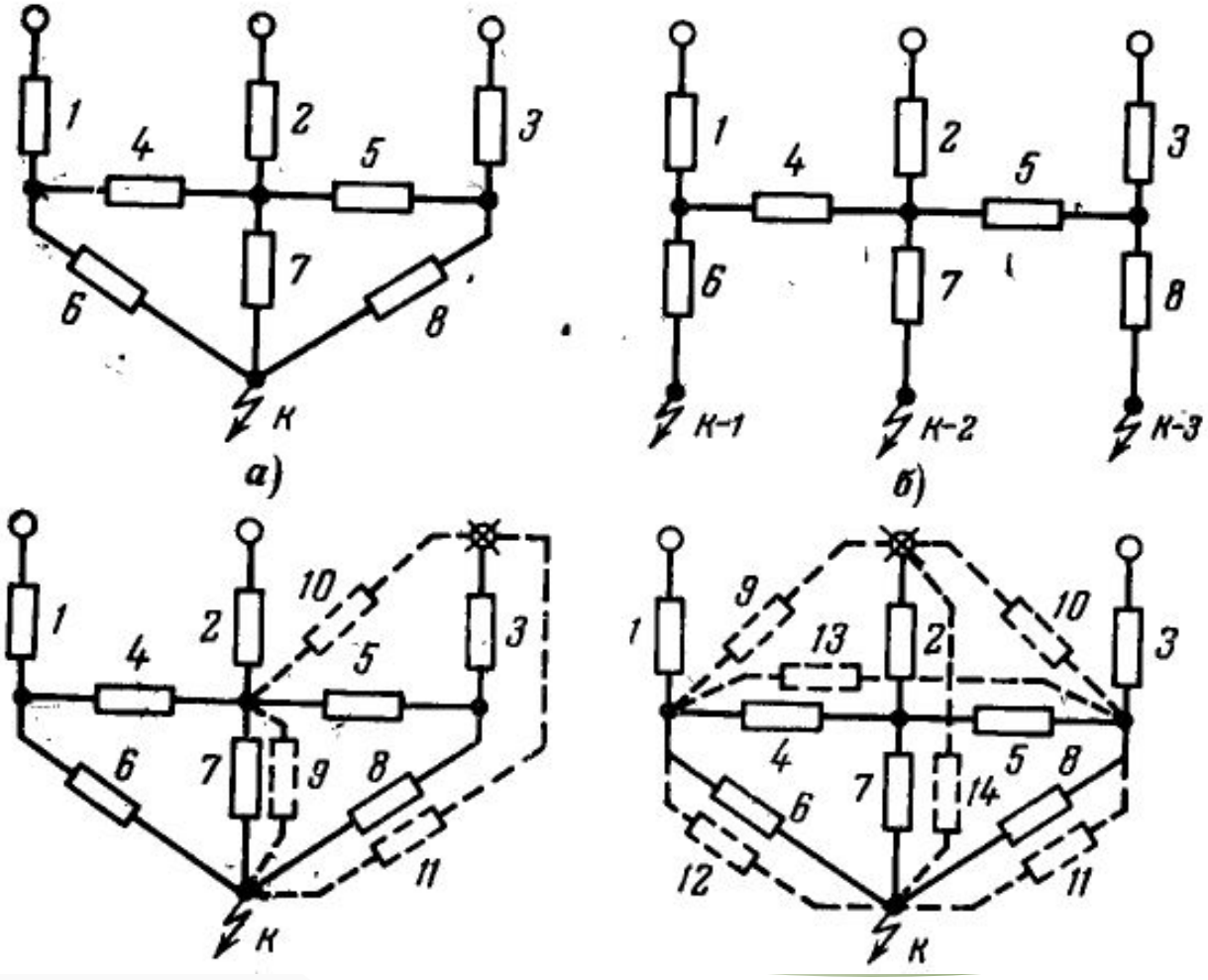
$$\dot{I}_F = \dot{I}_{FG} - \dot{I}_{HF}$$

$$\dot{I}_G = \dot{I}_{GH} - \dot{I}_{FG}$$

$$\dot{I}_H = \dot{I}_{HF} - \dot{I}_{GH}$$

Токи коротких замыканий

6. Метод рассечения в узле КЗ



Токи коротких замыканий

Выражение сопротивлений элементов схемы замещения в относительных базисных единицах (о.б.е.) с учетом приведения к одной ступени напряжения

1. Генератор Для получения сопротивления в о.б.е. пользуются паспортными параметрами (номинальный ток или мощность, номинальное напряжение, сопротивление в о.н.е или в %). Тогда сопротивление генератора в именованных единицах

$$X_{г(Ом)} = X_{г*(н)} \cdot X_{г(ном)} = X_{г*(н)} \cdot \frac{U_н^2}{S_н}$$

А в о.б.е.

$$X_{г*(б)} = \frac{X_{г(Ом)}}{X_б} \cdot К_т^2 = \frac{X_{г*(н)} \cdot S_б \cdot U_н^2}{S_н \cdot U_б^2} \cdot К_т^2$$

Зная, что $К_т = \frac{U_б}{U_н}$, получим $X_{г*(б)} = \frac{X_{г*(н)} \cdot S_б}{S_н}$

9. Применение метода собственных и взаимных сопротивлений

В схеме с произвольным числом источников с э. д. с. $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \ldots, \dot{E}_n$ для тока, например, источника *1*, считая положительным направление тока от источника к внешней сети, по принципу наложения можно записать:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12} - I_{13} - \ldots - \dot{I}_{1n} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{11}} - \frac{\dot{E}_2}{Z_{12}} - \frac{\dot{E}_3}{Z_{13}} -$$

$$- \ldots - \frac{\dot{E}_n}{Z_{1n}} = Y_{11}\dot{E}_1 - Y_{12}\dot{E}_2 - Y_{13}\dot{E}_3 -$$

$$- \ldots - Y_{1n}\dot{E}_n, \qquad (1)$$

где каждый из токов обусловлен действием лишь одной э. д. с. при равенстве нулю всех прочих, т. е.

$\dot{I}_{11} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{11}} = Y_{11}\dot{E}_1$ — собственный ток источника *1*, созданный только его э. д. с. $\dot{E}_1$;

$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{E}_2}{Z_{12}} = Y_{12}\dot{E}_2$ — взаимный ток источника *1*, вызванный только э. д. с. $\dot{E}_2$ и т. д.

Токи коротких замыканий

Здесь $Z_{11}, Z_{12}, \ldots, Z_{1n}$ и $Y_{11}, Y_{12}, \ldots, Y_{1n}$ — соответственно собственные и взаимные сопротивления и проводимости источника *1* в рассматриваемой схеме.

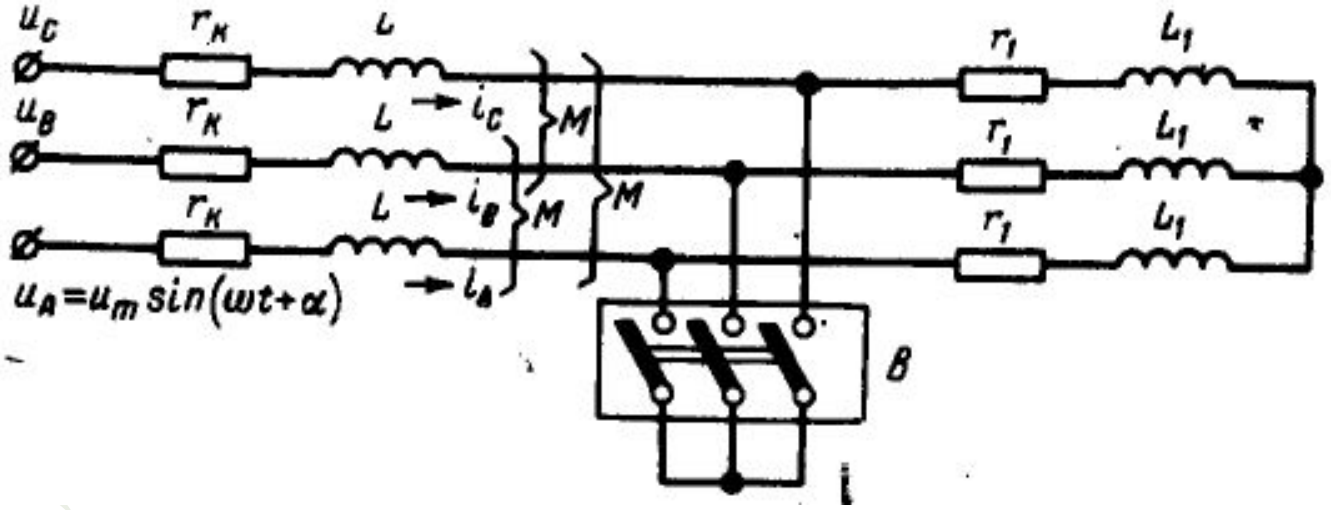
Аналогично для тока в месте короткого замыкания имеем:

$$\dot{I}_{к} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{1к}} + \frac{\dot{E}_2}{Z_{2к}} + \cdots + \frac{\dot{E}_n}{Z_{nк}} =$$
$$= Y_{1к}\dot{E}_1 + Y_{2к}\dot{E}_2 + \ldots + Y_{nк}\dot{E}_n,$$

где $Z_{1к}, Z_{2к}, \ldots, Z_{nк}$ и $Y_{1к}, Y_{2к}, \ldots, Y_{nк}$ — взаимные сопротивления и проводимости между каждым источником и точкой короткого замыкания.

Токи коротких замыканий

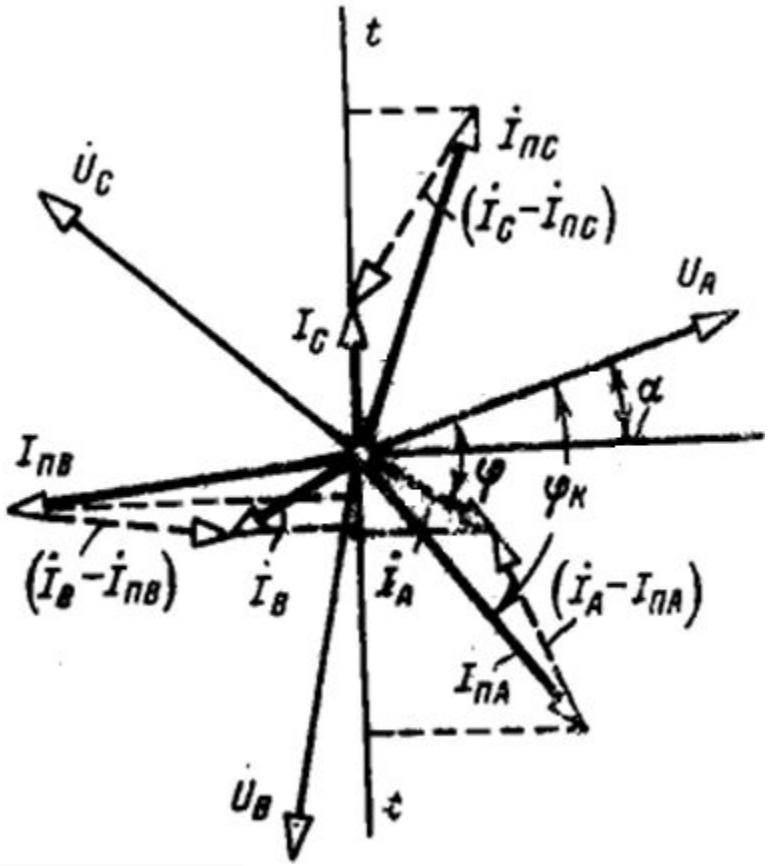
Переходный процесс в простейшей трехфазной цепи



После включения выключателя B цепь рис. распадается на два независимых друг от друга участка. Участок с r_1 и L_1 оказывается зашунтированным коротким замыканием и ток в нем будет поддерживаться лишь до тех пор, пока запасенная в индуктивности L_1 энергия магнитного потока не перейдет в тепло, поглощаемое активным сопротивлением r_1.

Дифференциальное уравнение равновесия в каждой фазе этого участка имеет вид:

Токи коротких замыканий

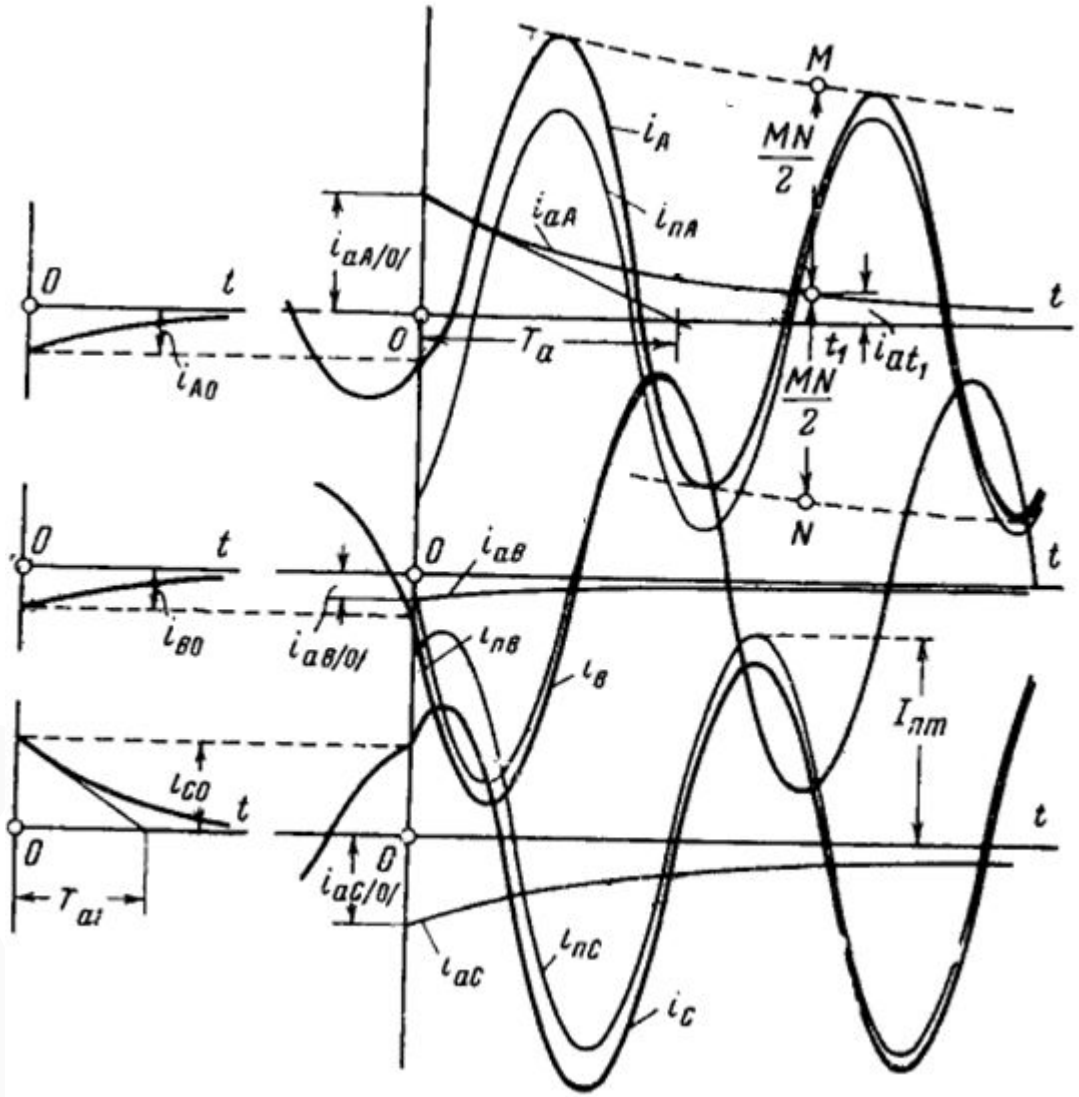


$$0 = ir_1 + L_1 \frac{di}{dt}$$

$$i = i_0 e^{-t/T_{a1}}$$

$$T_{a1} = \frac{L_1}{r_1} = \frac{x_1}{\omega r_1}, \text{ сек}$$

Токи коротких замыканий



Токи коротких замыканий

$$u_A = i_A r_к + L\frac{di_A}{dt} + M\frac{di_B}{dt} + M\frac{di_C}{dt}$$

$$(i_B + i_C) = -i_A \qquad L_к = (L - M)$$

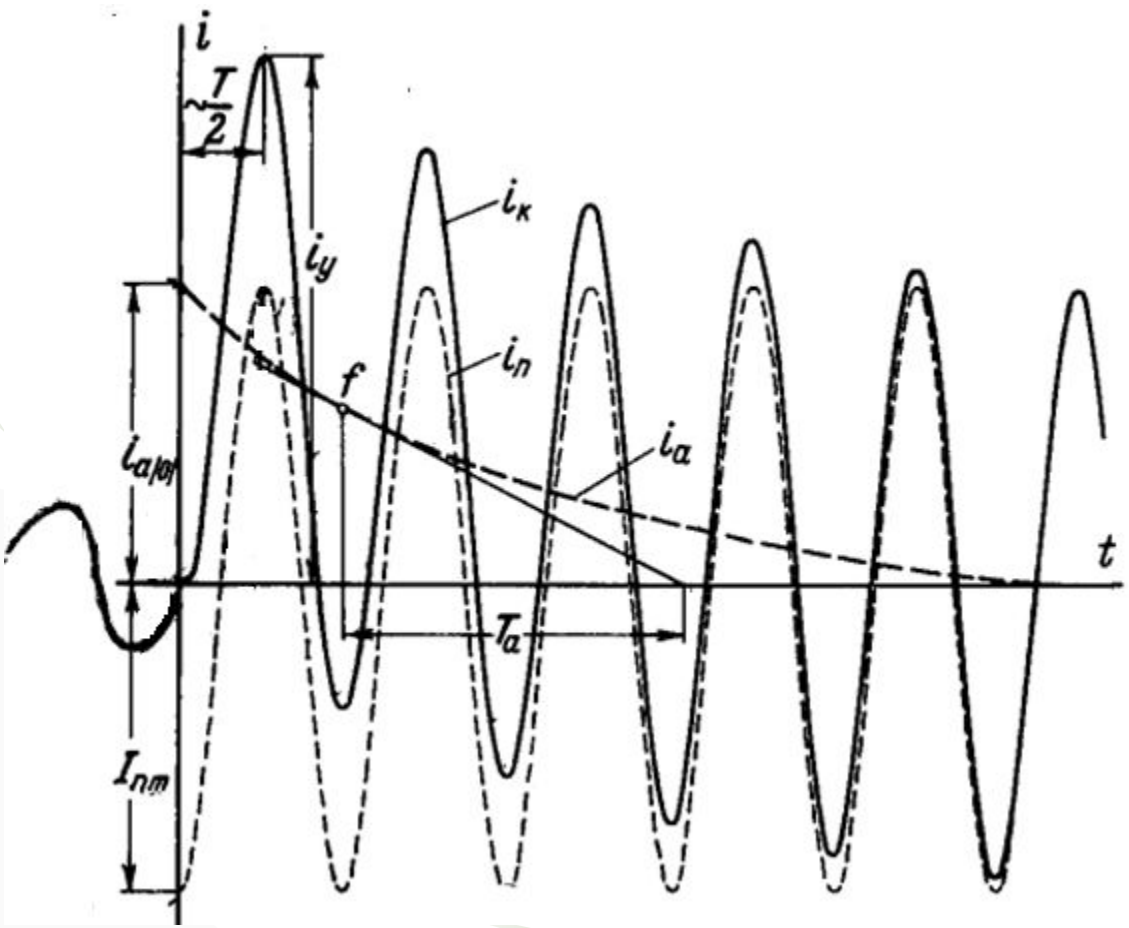
$$u = ir_к + L_к\frac{di}{dt}$$

$$i = \frac{U_m}{z_к}\sin(\omega t + \alpha - \varphi_к) + i_{а|0|}\,e^{-t/T_а}$$

$$i_0 = i_{п\ |0|} + i_{а\ |0|}$$

Токи коротких замыканий

$$i_{a|0|} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_к).$$



Токи коротких замыканий

$$i = I_{\text{п}m}\left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{к}}) - \sin(\alpha - \varphi_{\text{к}})\, e^{-t/T_{\text{а}}}\right]$$

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_{\text{к}}) = -\omega T_{\text{а}} = -\frac{x_{\text{к}}}{r_{\text{к}}} = \operatorname{tg}(-\varphi_{\text{к}}).$$

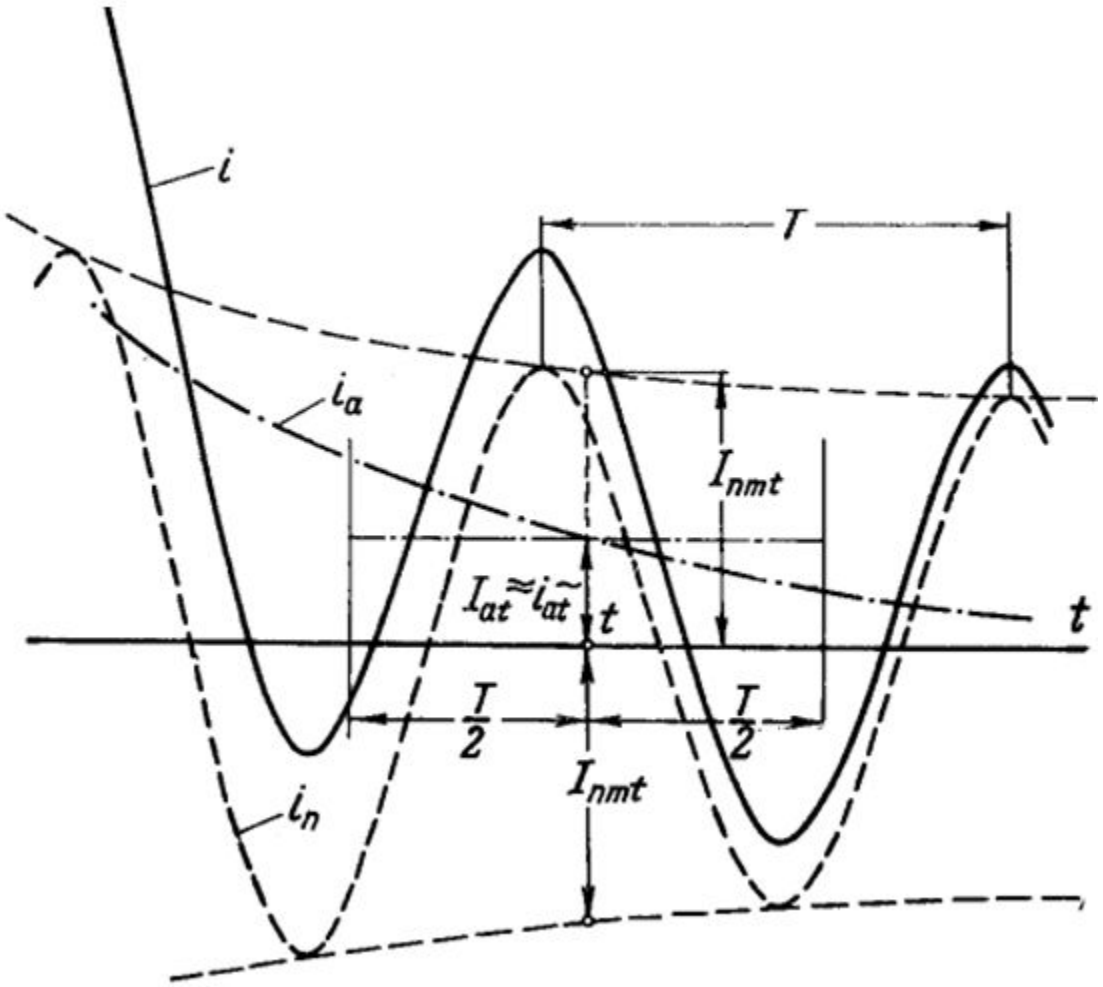
Следовательно, в предварительно разомкнутой цепи с r и L максимум мгновенного значения полного тока при коротком замыкании наступает, если в момент возникновения короткого напряжение источника проходит через нуль.

$$i_{\text{у}} = I_{\text{п}m} + I_{\text{п}m} e^{-0{,}01/T_{\text{а}}} = k_{\text{у}} I_{\text{п}m},$$

$$k_{\text{у}} = 1 + e^{-0{,}01/T_{\text{а}}} \qquad 1 < k_{\text{у}} < 2$$

Токи коротких замыканий

Действующее значение тока КЗ



Токи коротких замыканий

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t-T/2}^{t+T/2} i^2 dt}$$

$$I_{nt} = I_{nmt}/\sqrt{2}$$

$$I_{at} = i_{at}$$

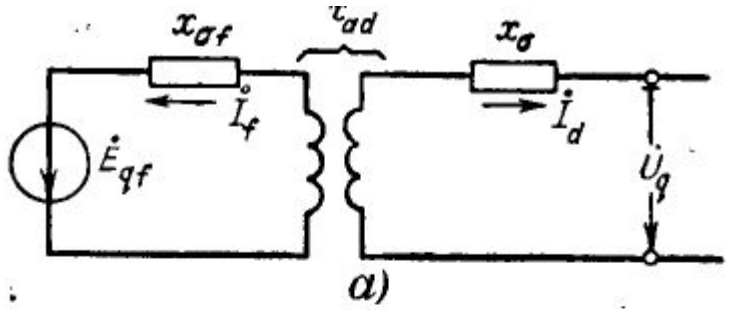
$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2}$$

$$I_y = \sqrt{I_n^2 + [(k_y - 1)\sqrt{2}\, I_n]^2} = I_n \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}$$

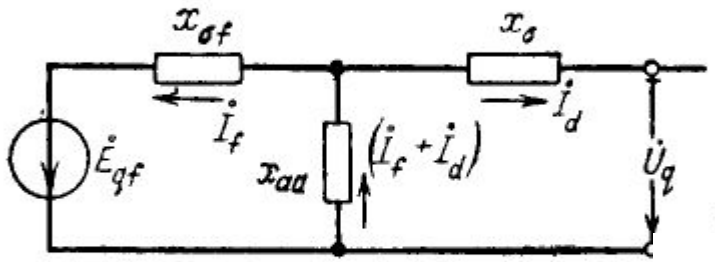
Токи коротких замыканий

Внезапное КЗ синхронной машины

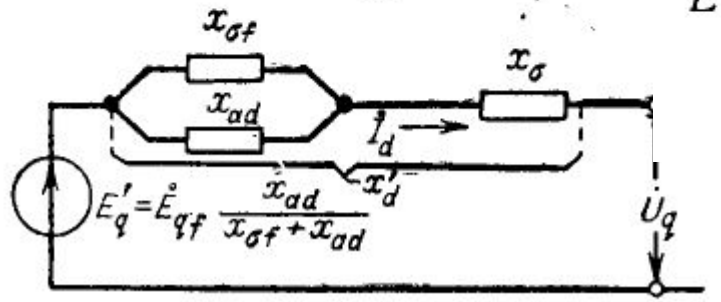
Параметры схемы замещения СГ в начальный и установившийся моменты переходного процесса



а)



б)

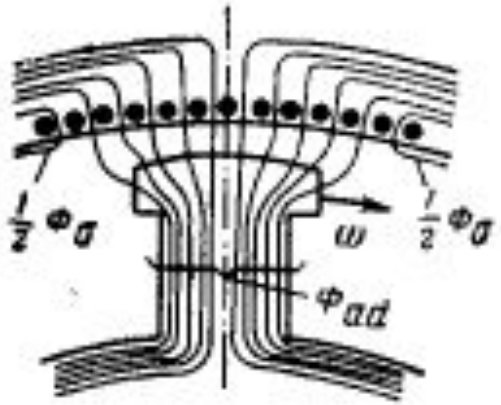


в)

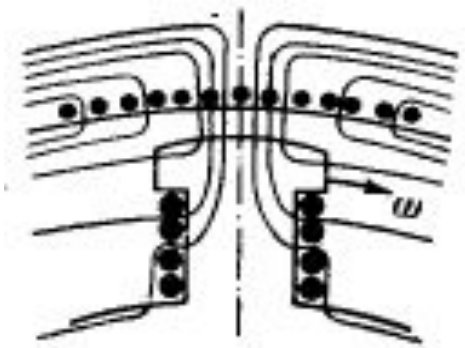
$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f}$$

$$\dot{E}'_q = \dot{E}_q - j\dot{I}_d \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \dot{U}_q + j\dot{I}_d \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right) = \dot{U}_q + j\dot{I}_d x'_d,$$

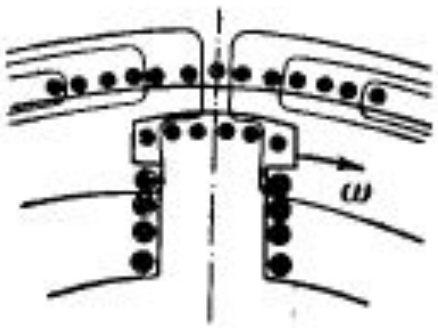
В стационарном режиме создаваемый током статора магнитный поток частично замыкается по путям рассеяния статорной обмотки, а основная его часть, пройдя воздушный зазор, свободно замыкается через полюсы и массив ротора Поскольку сопротивление для магнитного потока в данных условиях относительно мало, то индуктивность, представляющая в сущности величину магнитного потока на единицу намагничивающей силы, получается большой. В продольной оси ротора она определяет известную синхронную реактивность x_d.



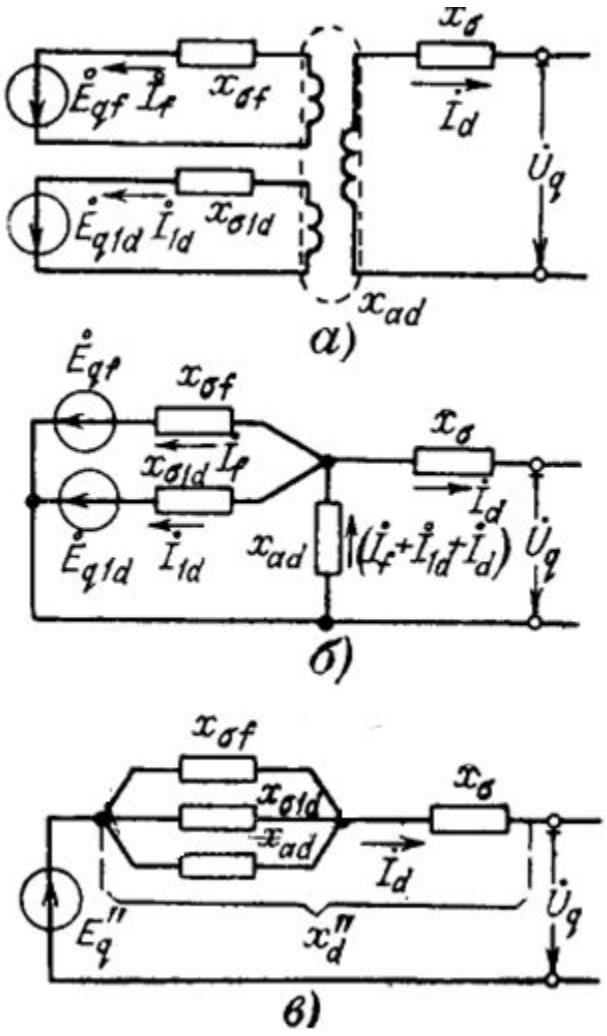
При внезапном изменении магнитного потока статора в обмотке возбуждения наводится ток, который создает магнитный поток, направленный навстречу потоку статора, т. е. последний встречает большее сопротивление и известная часть его вытесняется на пути рассеяния обмотки возбуждения. Та же намагничивающая сила статора в этих условиях создает меньший магнитный поток, что и обусловливает соответственно меньшую величину переходной продольной реактивности x'_d по сравнению с реактивностью x_d



При наличии демпферной обмотки в продольной оси ротора вытеснение внезапно изменившегося магнитного потока статора получается более интенсивным, поскольку в этом участвуют совместно обмотка возбуждения и продольная демпферная обмотка. Сопротивление потоку статора в этом случае еще больше возрастает и, следовательно, величина этого потока при той же намагничивающей силе становится меньше, чем и объясняется меньшее значение продольной сверхпереходной реактивности x''_d по сравнению с реактивностью x'_d



Токи коротких замыканий

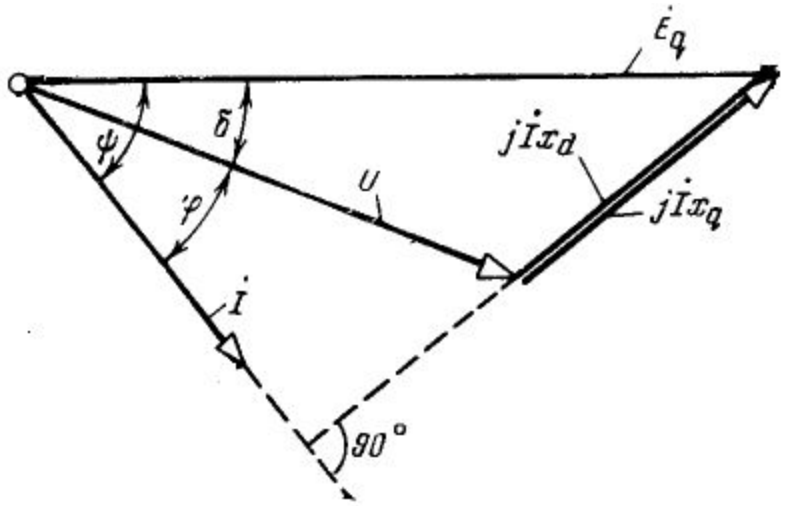


$$x''_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma rd} + x_{ad}} = x_\sigma + \frac{x_{\sigma rd} x_{ad}}{x_{\sigma rd} + x_{ad}} = x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_{\sigma 1d}}}$$

$$\dot{E}''_{q|0|} = \dot{E}''_{q0} = \dot{U}_{q0} + j\dot{I}_{d0} x''_d$$

Токи коротких замыканий

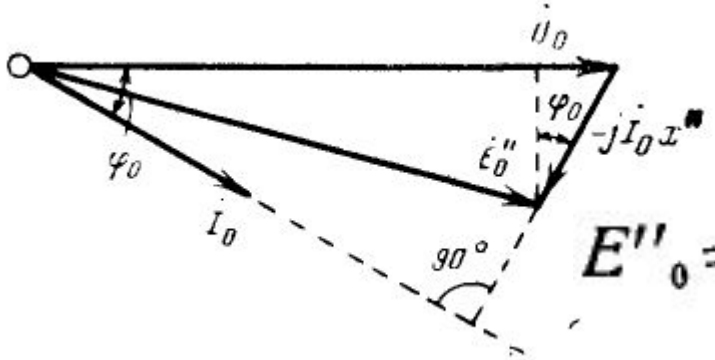
$$E_q = \sqrt{(U\cos\varphi)^2 + (U\sin\varphi + Ix_d)^2}$$



$$E''_{\Phi} = \sqrt{\left(U_{\Phi(0)} + I_{(0)}x''_d \sin\varphi_{(0)}\right)^2 + \left(I_{(0)}x''_d \cos\varphi_{(0)}\right)^2}$$

Токи коротких замыканий

Характеристики двигателей и нагрузки



$$E''_0 = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 - I_0 x'')^2}$$

$$x''_{АД} = \frac{1}{K_п} \frac{U^2_{ном} \cos \varphi_{ном} \eta}{P_{ном}}$$

где $K_п$ - кратность пускового тока электродвигателя по отношению к его номинальному току;

$U_{ном}$ - номинальное напряжение электродвигателя, кВ;

$\cos \varphi_{ном}$ - номинальный коэффициент мощности электродвигателя;

η - КПД электродвигателя, %;

$P_{ном}$ - номинальная мощность электродвигателя, МВт.

$$x'' = 1/I_{пуск}$$

$$x''_{нагр} = 0{,}35$$

$$E''_{нагр} = 0{,}85$$

Токи коротких замыканий

Средние значения x'' и E_0'' (в относительных единицах при номинальных условиях)

Наименование элемента	x''	E''_0
Турбогенератор мощностью до 100 *Мвт*	0,125	1,08
То же мощностью 100—500 *Мвт*	0,20	1,13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	0,20	1,13
То же без демпферных обмоток	0,27	1,18
Синхронный двигатель	0,20	1,10
Синхронный компенсатор	0,20	1,20
Асинхронный двигатель	0,20	0,90
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Токи коротких замыканий

Значения x/r для элементов электрической системы

Наименование элемента	Отношение x/r
Турбогенераторы мощностью до 100 *Мвт*	15—85
То же мощностью 100—500 *Мвт*	100—140
Гидрогенераторы с демпферными обмотками	40—60
То же без демпферных обмоток	60—90
Трансформаторы мощностью 5—30 *Мва*	7—17
То же мощностью 60—500 *Мва*	20—50
Реакторы 6—10 *кв* до 1 000 *а*	15—70
То же 1 500 *а* и выше	40—80
Воздушные линии	2—8
Трехжильные кабели 6—10 *кв* с медными и алюминиевыми жилами сечением 3×95—3×185 *мм*²	0,2—0,8
Обобщенная нагрузка	2,5

Приближенный учет системы

$$x_C = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3}\, I''} = \frac{U_{ср}^2}{S''_к}, \text{ ом}$$

$$x_{*C(б)} = \frac{I_б}{I''} = \frac{S_б}{S''_к},$$

За этой реактивностью считают подключенным источник бесконечной мощности, т. е. напряжение за x_C принимают неизменным и равным $U_{ср}$

Расчет токов КЗ и выбор электрооборудования

Расчетные условия для проверки аппаратуры и токоведущих частей по режиму короткого замыкания

Электрические аппараты и шинные конструкции распределительных устройств должны быть проверены на электродинамическую и термическую устойчивость. *Расчетным видом короткого замыкания* при проверке электродинамической стойкости аппаратов и жестких шин с относящимися к ним поддерживающими и опорными конструкциями является трехфазное короткое замыкание. Термическую стойкость следует проверять также по трехфазному короткому замыканию. Исключение представляют аппараты и проводники в цепи генераторов, для которых необходимо проверить их термическую стойкость при времени действия резервной защиты генератора. Аппаратура и токопроводы, применяемые в цепях генераторов мощностью 60 МВт и более, а также в цепях блоков генератор-трансформатор такой же мощности, должны проверяться по термической стойкости, исходя из расчетного времени короткого замыкания 4с. Поэтому для цепи генератора следует рассмотреть трёхфазное и двухфазное короткое замыкание.

Отключающую способность аппаратов в незаземленных или резонансно-заземленных сетях (сети напряжением до 35 кВ включительно) следует проверять по току трехфазного короткого замыкания.

В эффективно-заземленных сетях (сети напряжением 110 кВ и выше) определяют токи при трехфазном и однофазном коротком замыкании, а проверку отключающей способности делают по более тяжелому режиму с учетом условий восстановления напряжения.

Проверка на электродинамическую стойкость. Ударные токи короткого замыкания могут вызвать поломки электрических аппаратов и шинных конструкций. Чтобы этого не произошло, каждый тип аппаратов испытывают на заводе, устанавливая для него наибольший допустимый ток короткого замыкания (амплитудное значение полного тока) $i_{дин}$. В литературе встречается и другое название этого тока – предельный сквозной ток короткого замыкания $i_{пр.скв}$.

Условие проверки на электродинамическую стойкость имеет вид

$$i_у \leq i_{дин},$$

где $i_у$ – расчетный ударный ток в цепи.

Проверка на термическую стойкость. Проводники и аппараты при коротком замыкании не должны нагреваться выше допустимой температуры, установленной нормами для кратковременного нагрева.

Для термической стойкости аппаратов должно быть выполнено условие

$$B_к \le I^2_{тер} \cdot t_{тер},$$

где $B_к$ – импульс квадратичного тока короткого замыкания, пропорциональный количеству тепловой анергии, выделенной за время короткого замыкания;

$I_{тер}$ – номинальный ток термической стойкости аппарата;

$t_{тер}$ – номинальное время термической стойкости аппарата.

Импульс квадратичного тока короткого замыкания

$$B_к = \int I^2_{к.t} dt = B_{к.п} + B_{к.а}$$

где $I_{к.t}$ – действующее значение полного тока короткого замыкания в момент t;

$t_{отк}$ – время от начала короткого замыкания до его отключения;

$t_{отк} = t_{р.з} + t_{о.в}$,

$B_{к.п}$ – тепловой импульс периодической составляющей тока короткого замыкания;

$B_{к.а}$ –тепловой импульс апериодической составляющей тока короткого замыкания.

Для удаленного КЗ

$$B_к = I^2_{п0} \cdot (t_{отк} + T_а)$$

Выбор выключателей

Выключатели выбирают:

- по номинальному напряжению $U_{уст} \leq U_{ном}$
- по номинальному току $I_{норм} \leq I_{ном}$; $I_{max} \leq I_{ном}$
- по отключающей способности.

По ГОСТ 687-78Е отключающая способность выключателя характеризуется следующими параметрами:

а) номинальным током отключения $I_{отк.ном}$ в виде действующего значения периодической составляющей отключаемого тока;

б) допустимым относительным содержанием апериодической составляющей в токе отключения $\beta_н$,%;

в) нормированными параметрами переходного восстанавливающего напряжения (ПВН).

Номинальный ток отключения $I_{отк.ном}$ и $\beta_н$ отнесены к моменту прекращения соприкосновения дугогасительных контактов выключателя τ. Время $\boldsymbol{\tau}$ от начала короткого замыкания до прекращения соприкосновения дугогасительных контактов определяют по выражению

$$\tau = t_{з.min} + t_{с.в},$$

где $t_{з.min}$ = 0,01 с – минимальное время действия релейной защиты;

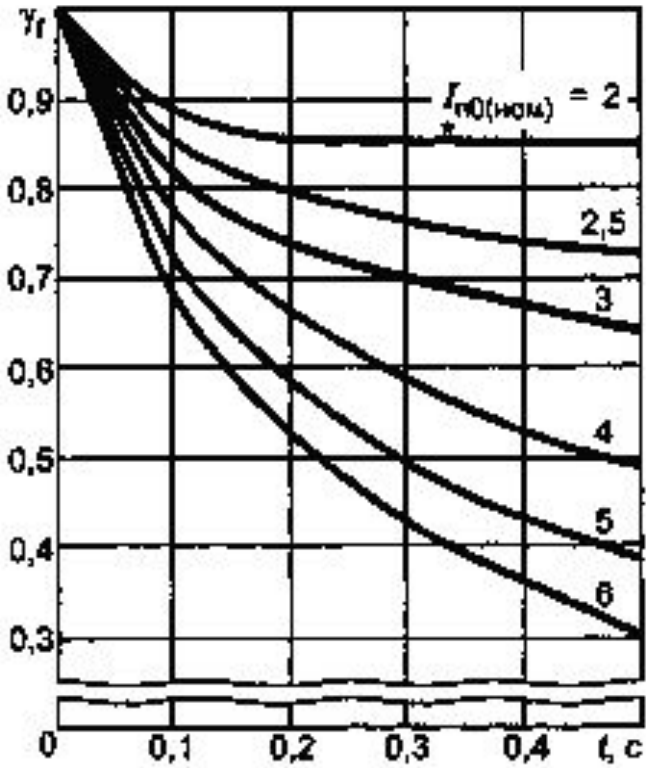
$t_{с.в}$ – собственное время отключения выключателя.

Допустимое относительное содержание апериодической составляющей (нормированная асимметрия номинального тока отключения) в отключаемом токе

$$\beta_н = (i_{а.ном} / \sqrt{2}\, I_{отк.ном}) * 100\%$$

где $i_{а.ном}$-номинальное допускаемое значение апериодической составляющей в отключаемом токе в момент размыкания дугогасительных контактов для времени τ.

Если $\boldsymbol{\tau} > 0{,}09$с, то принимают $\beta_н = 0$



Типовые кривые изменения относительного значения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов с тиристорной системой само возбуждения

Удаленность точки КЗ от синхронной машины характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока этой машины в начальный момент КЗ к номинальному току машины

$$I_{*n0(ном)} = \frac{I_{n0}}{I_{ном}} = I_{*n0(б)} \frac{S_б}{S_{ном}} \frac{U_{ном}}{U_б}$$

$$\frac{I_{nt}}{I_{n0}} = \gamma_t$$

Если отношение действующего значения периодической составляющей тока синхронной машины в начальный момент КЗ к ее номинальному току менее двух, то короткое замыкание следует считать удаленным и периодическую составляющую тока КЗ принимать неизменной по амплитуде.

В первую очередь производится проверка на симметричный ток отключения по условию

$$I_{п.\tau} \leq I_{отк.ном},$$

где $I_{п.\tau}$ – действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания для времени **τ**, определяется расчетом.

Затем проверяется возможность отключения апериодической составляющей тока короткого замыкания $i_{а.\tau}$ в момент расхождения контактов τ по условию

$$i_{а.\tau} \leq i_{а.ном} = \sqrt{2}\, I_{отк.ном} * \beta_н / 100$$

Если условие $I_{п.\tau} \leq I_{отк.ном}$ выполняется, а $i_{а.\tau} > i_{а.ном}$, то допускается проверку по отключающей способности производить по полному току короткого замыкания:

$$\sqrt{2}\, I_{п.\tau} + i_{а.\tau} \leq \sqrt{2}\, I_{отк.ном} * (1 + \beta_н / 100)$$

Проверка на электродинамическую стойкость выполняется по условиям

$$I_{п.0} \leq I_{пр.скв} = I_{дин} \qquad i_у \leq i_{пр.скв} = i_{дин}$$

На термическую стойкость выключатель проверяется по тепловому импульсу тока короткого замыкания:

$$B_к \leq I^2_{тер} \cdot t_{тер}$$

Выбор разъединителей, отделителей, выключателей нагрузки и короткозамыкателей

Разъединители, отделители, выключатели нагрузки выбираются:

- по номинальному напряжению
- по номинальному длительному току
- по конструкции, роду установки;
- по электродинамической стойкости
- по термической стойкости

Короткозамыкатели выбираются по тем же условиям, но выбор по номинальному току не требуется.

При выборе выключателей нагрузки следует добавить условие выбора по току отключения:

$$I_{раб.max} \leq I_{отк},$$

где $I_{отк}$ – номинальный ток отключения выключателя нагрузки.

Отключающая способность выключателя нагрузки рассчитана на отключение токов рабочего режима.

Выбор трансформаторов тока

Трансформаторы тока, предназначенные для питания измерительных приборов, выбираются:

- по номинальному напряжению
- по номинальному току (причем, номинальный ток должен быть как можно ближе к рабочему току установки, так как недогрузка первичной обмотки приводит к увеличению погрешностей);
- по конструкции и классу точности;
- по электродинамической стойкости
- по термической стойкости;

Выбор класса точности определяет назначение трансформатора тока. В соответствии с ПУЭ:

а) трансформаторы тока для включения электроизмерительных приборов должны иметь класс точности не ниже 3;

б) обмотки трансформаторов тока для присоединения счётчиков, по которым ведутся денежные расчеты, должны иметь класс точности 0,5;

в) для технического учёта допускается применение трансформаторов тока класса точности 1.

Для обеспечения выбранного класса точности необходимо, чтобы действительная нагрузка вторичной цепи Z_2 не превосходила нормированной для данного класса точности нагрузки $Z_{2ном}$, Ом, т.е.

$$Z_2 \leq Z_{2ном}.$$

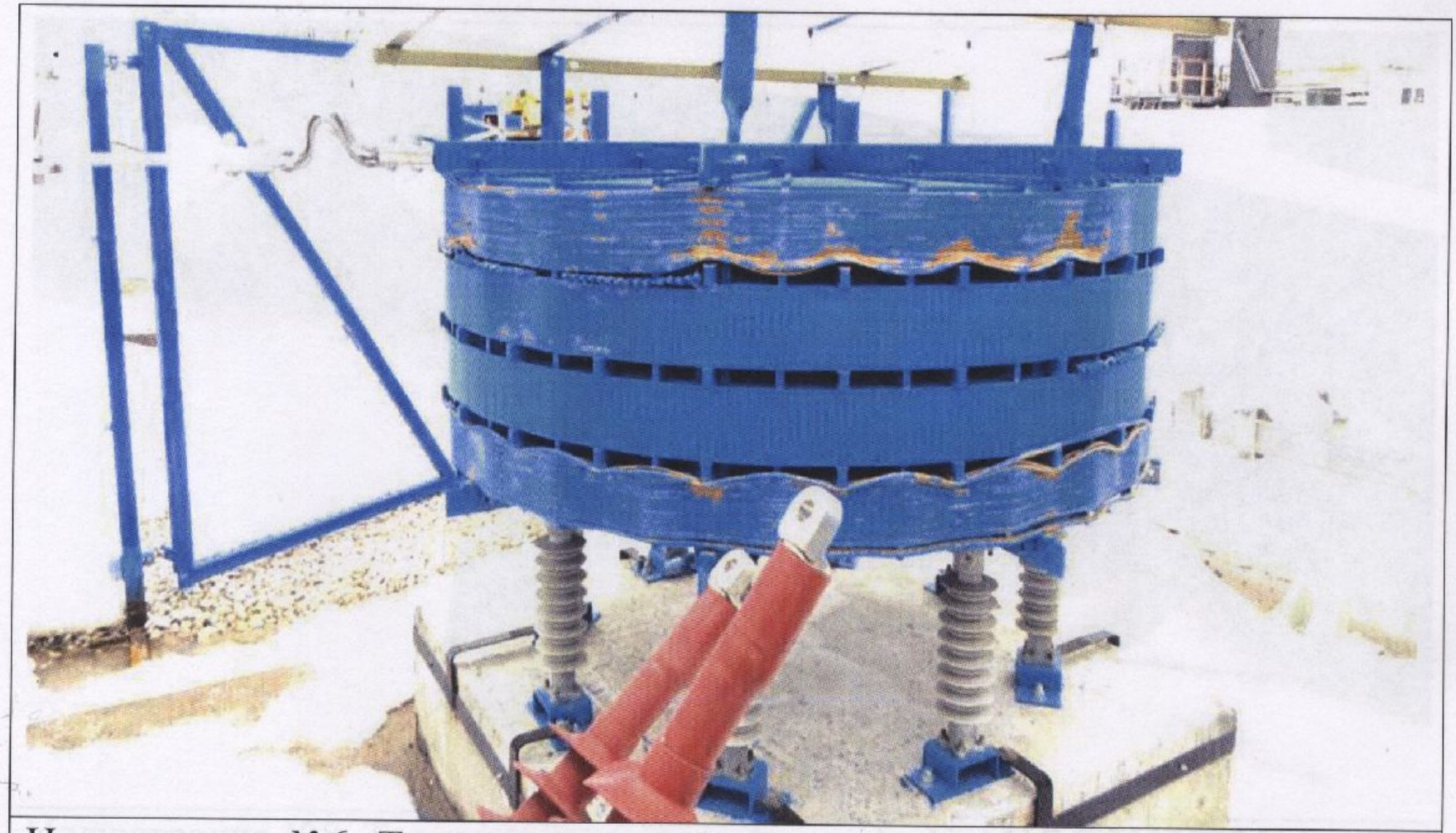


Иллюстрация №6. Токоограничивающий реактор РТСТГ-35-1600-1,0 УХЛ1 на фазе «С».

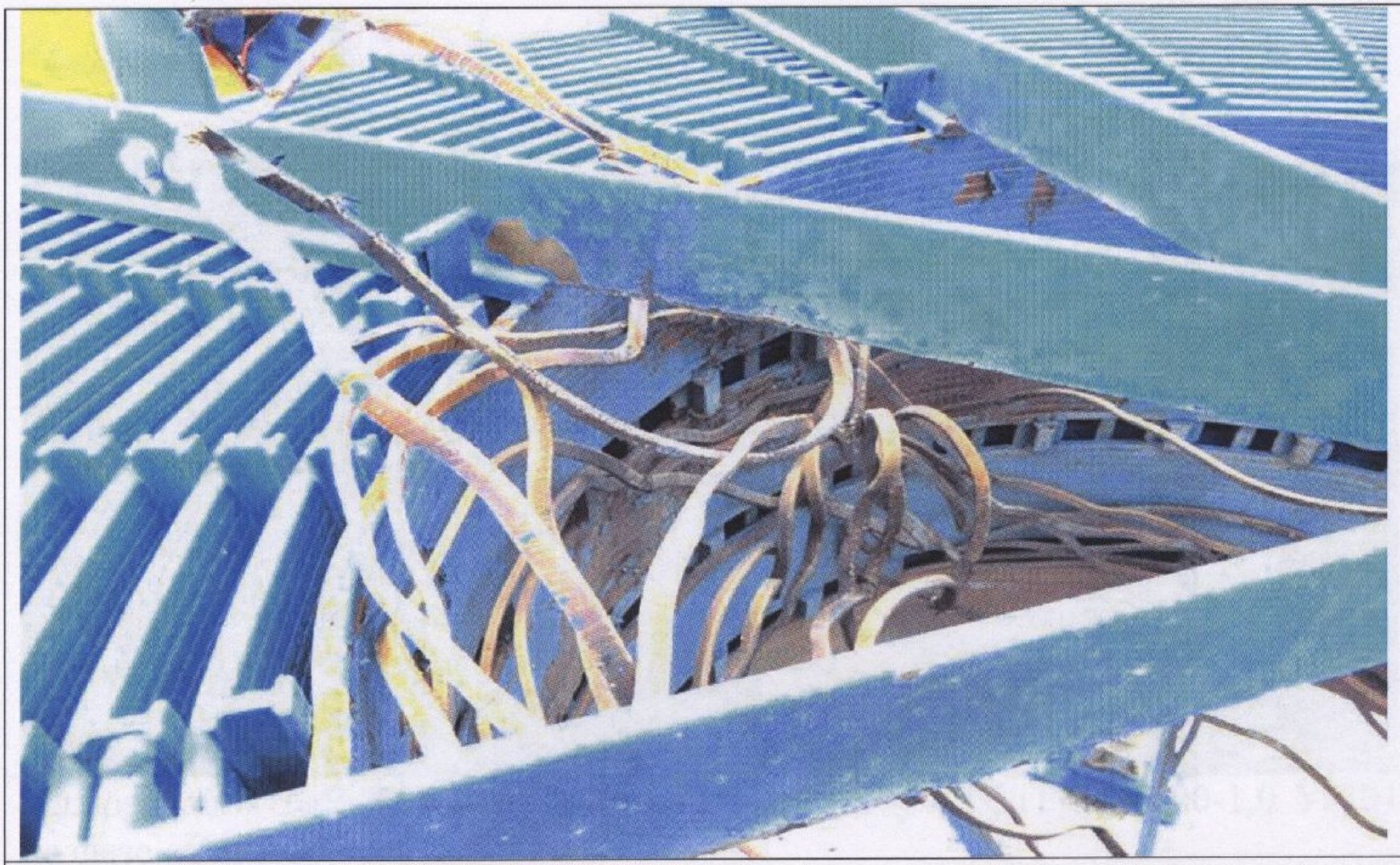


Иллюстрация №3. Токоограничивающий реактор РТСТГ-35-1600-1,0 УХЛ1 на фазе «А».

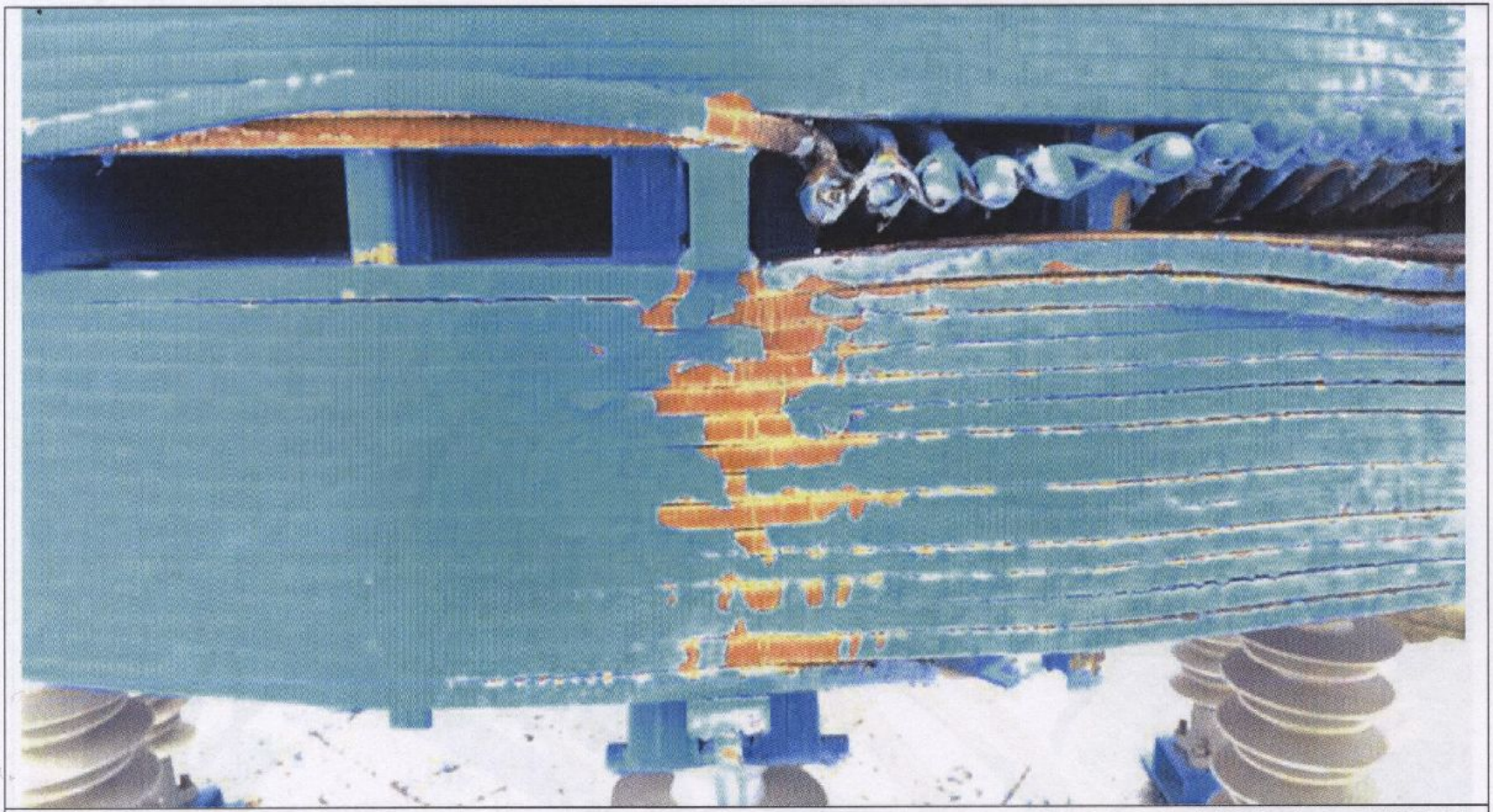
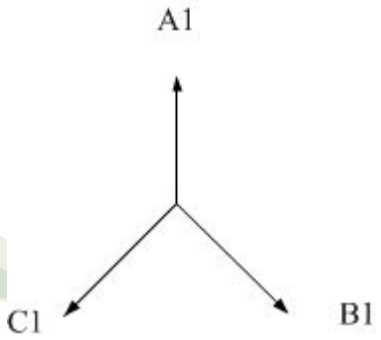


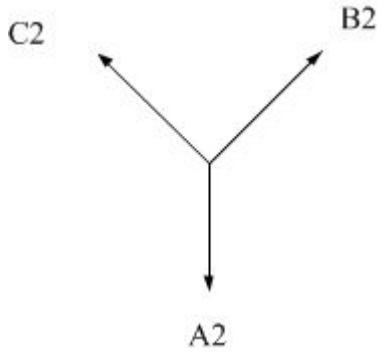
Иллюстрация №2. Токоограничивающий реактор РТСТГ-35-1600-1,0 УХЛ1 на фазе «А».

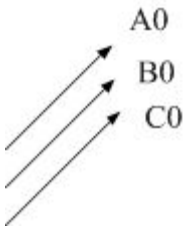
Токи коротких замыканий

Несимметричные короткие замыкания

Метод симметричных составляющих







$$F_A = F_{A1} + F_{A2} + F_0$$

$$F_B = a^2 F_{A1} + a F_{A2} + F_0$$

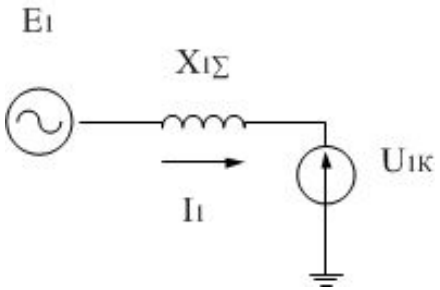
$$F_C = a F_{A1} + a^2 F_{A2} + F_0$$

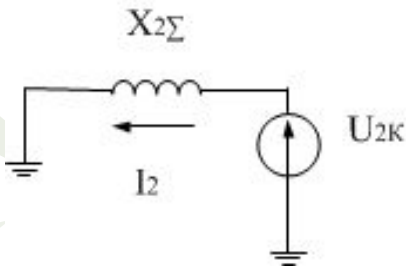
$$F_0 = \frac{1}{3}(F_A + F_B + F_C)$$

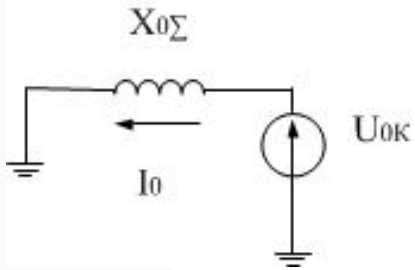
$$F_1 = \frac{1}{3}(F_A + a F_B + a^2 F_C)$$

$$F_2 = \frac{1}{3}(F_A + a^2 F_B + a F_C)$$

Токи коротких замыканий







$$\dot{U}_{к1} = \dot{E}_{\Sigma} - Z_{1\Sigma}\dot{I}_{к1};$$

$$\dot{U}_{к2} = 0 - Z_{2\Sigma}\dot{I}_{к2};$$

$$\dot{U}_{к0} = 0 - Z_{0\Sigma}\dot{I}_{к0};$$

Параметры схем замещения отдельных последовательностей

Прямая последовательность

Все параметры соответствуют параметрам симметричного режима

Обратная последовательность

При отсутствии магнитной связи между фазами какого-либо элемента его сопротивление не зависит от порядка чередования фаз тока. Активная и реактивная слагающие сопротивления такого элемента зависят только от частоты тока и, следовательно, для всех последовательностей одинаковы [3], т. е.

$$r_1 = r_2 = r_0$$

и

$$x_1 = x_2 = x_0;$$

соответственно

$$z_1 = z_2 = z_0.$$

Для элемента, магнитносвязанные цепи которого неподвижны относительно друг друга, сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы, так как от перемены порядка чередования фаз симметричной трехфазной системы токов взаимоиндукция между фазами такого элемента не изменяется.

Таким образом, для трансформаторов, автотрансформаторов, воздушных линий, кабелей и реакторов

$$r_1 = r_2$$

и

$$x_1 = x_2;$$

соответственно

$$z_1 = z_2.$$

Синхронные машины

$$x_2 = \lim_{x \to \infty} \frac{2x'_d x_q + (x'_d + x_q)\, x}{x'_d + x_q + 2x} = \frac{x'_d + x_q}{2}$$

В качестве приближенных соотношений принимают:

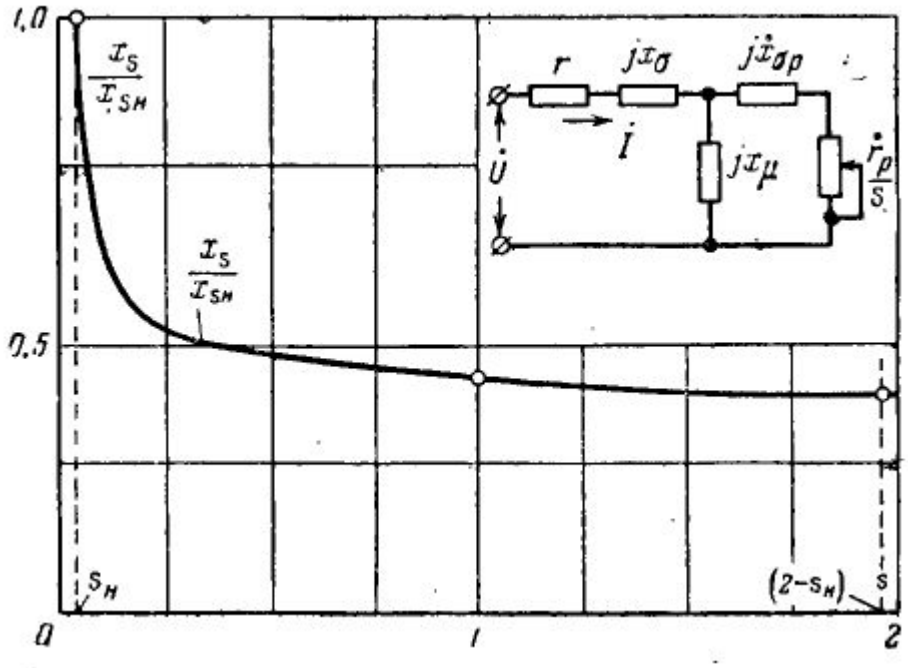
Для машин без демпферных обмоток	$x_2 \approx 1,45 x'_d$;
Для турбогенераторов и машин с демпферными обмотками в обеих осях ротора	$x_2 \approx 1,22\ x''_d$.

В практических приближенных расчетах обычно идут на дополнительное упрощение, принимая для турбогенераторов и машин с продольно-поперечными демпферными обмотками

$$x_2 \approx x''_d.$$

Токи коротких замыканий

Асинхронные двигатели



$$x_2 \approx x_{s=1} = x_к,$$

Обобщенная нагрузка

$$x_2 = 0{,}35,$$

Нулевая последовательность

Система токов нулевой последовательности резко отличается от систем токов прямой и обратной последовательностей, вследствие чего сопротивления нулевой последовательности в общем случае весьма существенно отличаются от соответствующих сопротивлений двух других последовательностей.

Синхронные машины

Токи нулевой последовательности создают практически только магнитные потоки рассеяния статорной обмотки, которые, как правило, меньше, чем при токах прямой или обратной последовательности, причем это уменьшение сильно зависит от типа обмотки. Поэтому величина x_0 синхронных машин колеблется в широких пределах:

$$x_0 = (0{,}15 \div 0{,}6)\, x''_d.$$

Асинхронные двигатели

Реактивность нулевой последовательности асинхронного двигателя, как и синхронных машин, определяется только рассеянием статорной обмотки и сильно зависит от типа и конструкции последней. Достаточно надежные значения этой реактивности могут быть получены преимущественно опытным путем или по данным завода-изготовителя.

Обобщенная нагрузка

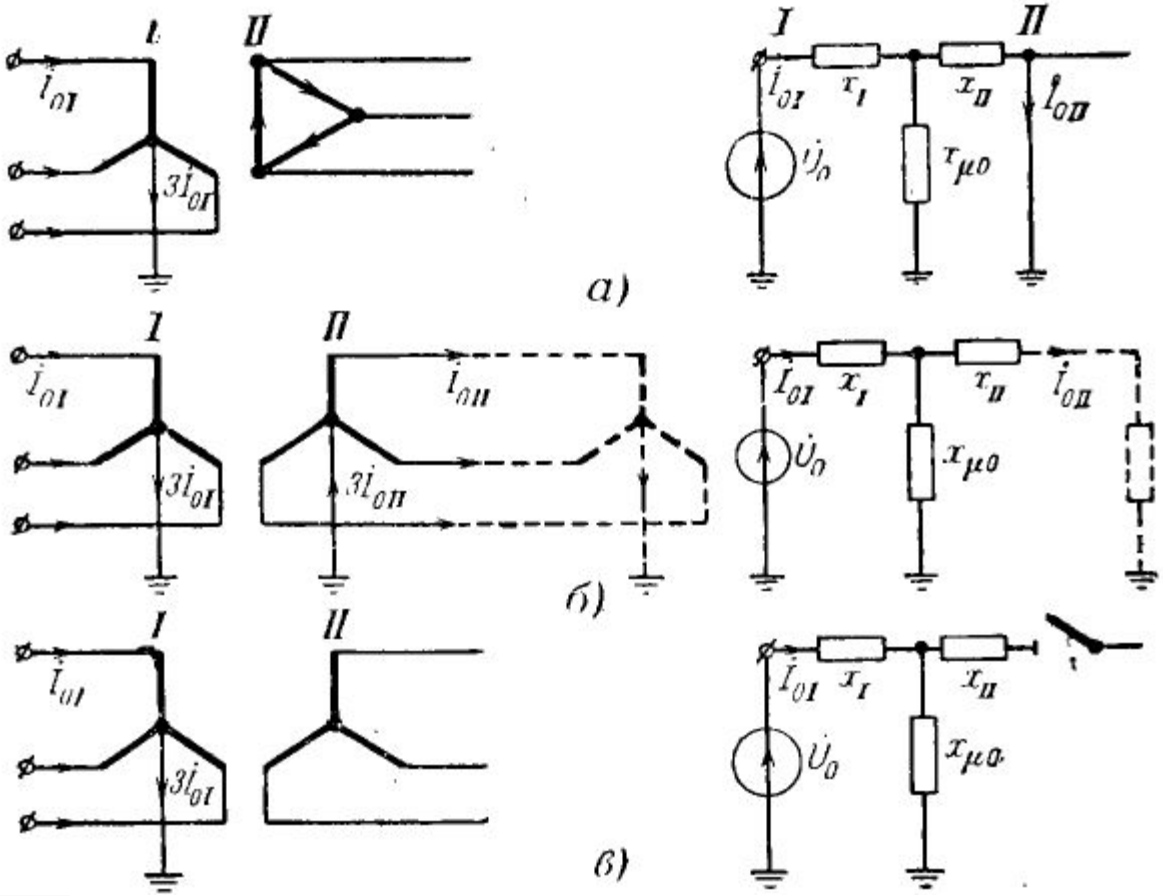
Поскольку обобщенная нагрузка включает в себя сеть и понижающие трансформаторы, ее сопротивление нулевой последовательности обычно определяется именно этими элементами, рассмотрение которых приведено ниже. Привести какие-либо средние величины этого сопротивления не представляется возможным.

Трансформаторы

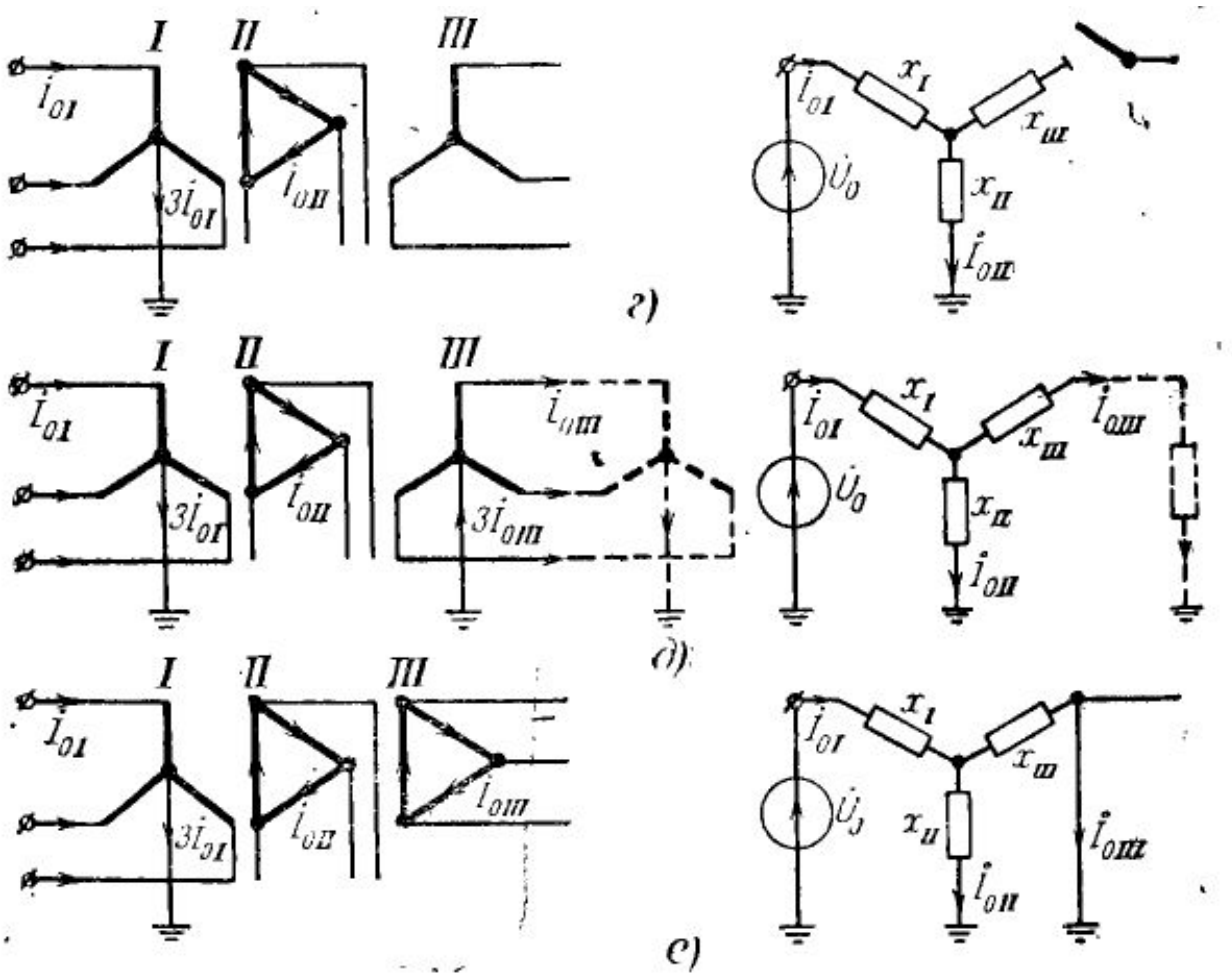
Реактивность нулевой последовательности трансформатора в значительной мере определяется его конструкцией и соединением обмоток.

Со стороны обмотки, соединенной в треугольник или в звезду без заземленной нейтрали, независимо от того, как соединены другие обмотки, реактивность нулевой последовательности трансформатора, очевидно, бесконечно велика ($x_0 = \infty$), так как при этих условиях вообще исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе. Следовательно, конечная, хотя иногда (см. ниже) и очень большая, реактивность нулевой последовательности трансформатора может быть только со стороны его обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью.

Токи коротких замыканий



Токи коротких замыканий



Токи коротких замыканий

Для группы из трех однофазных трансформаторов, а также для трехфазных четырех- и пятистержневых (броневых) трансформаторов ток намагничивания нулевой последовательности очень мал, так как в этом случае условия для магнитного потока практически те же, что и при питании трансформатора от источника напряжения прямой (или обратной) последовательности. Поэтому в соответствии с принятым ранее (§ 2-1) допущением можно считать $x_{\mu 0} = \infty$.

Иные условия имеют место в трехфазных трехстержневых трансформаторах, где магнитные потоки нулевой последовательности вынуждены замыкаться через изолирующую среду и кожух трансформатора. Для проведения магнитного потока по пути со столь высоким магнитным сопротивлением необходим достаточно большой ток намагничивания; следовательно, реактивность $x_{\mu 0}$ у трансформатора такого типа значительно меньше, чем $x_{\mu 1}$. В зависимости от конструкции этого типа трансформатора она находится в пределах $x_{\mu 0} = (0{,}3 \div 1{,}0)$. Имея в виду, что величина x_{II} все же значительно меньше $x_{\mu 0}$, можно практически считать, что и для трехстержневого трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ $x_{\mu 0} \approx \infty$.

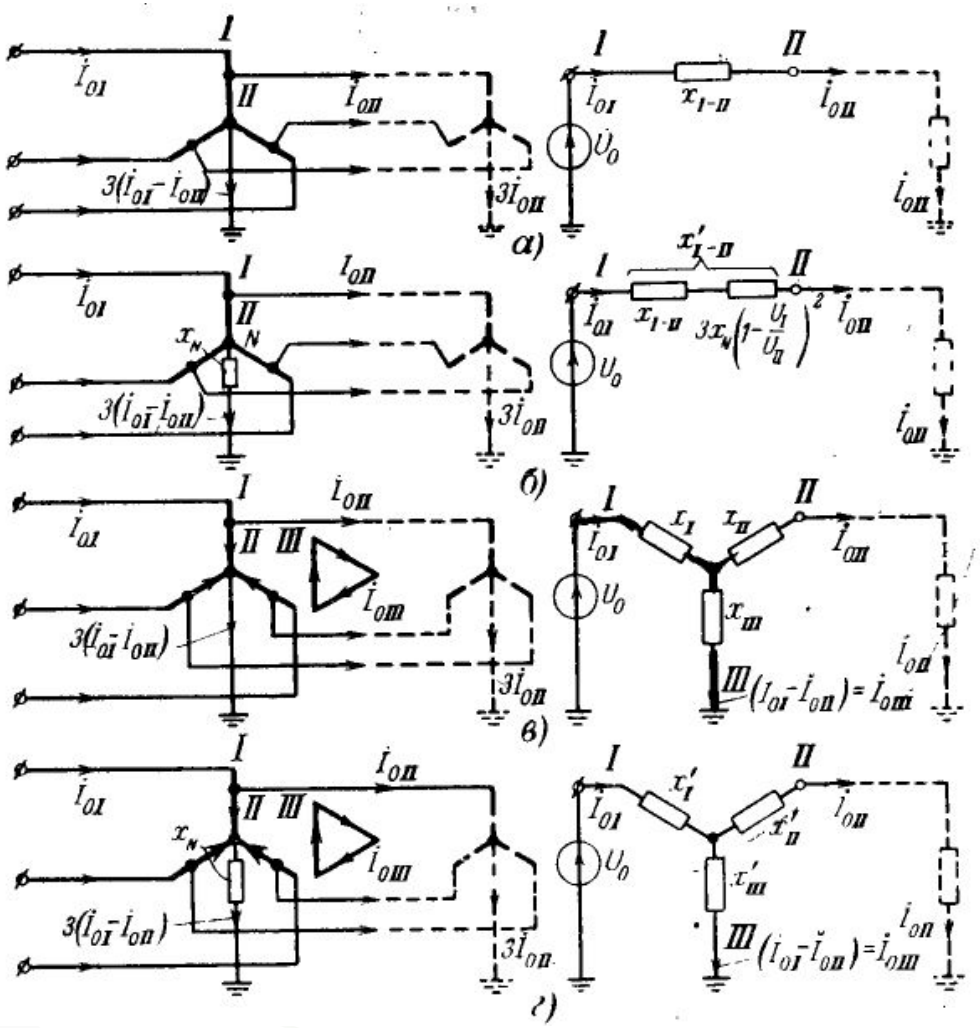
Токи коротких замыканий

Реактивности x_0 двухобмоточных трансформаторов

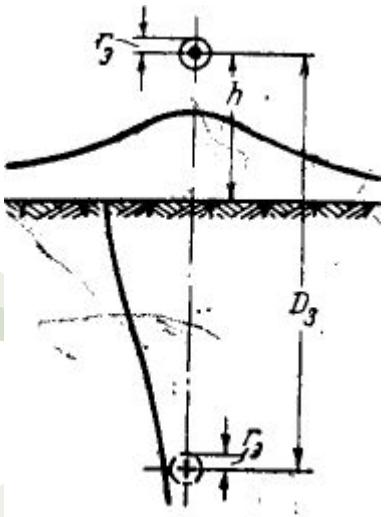
Тип трансформатора и соединение его обмоток	x_0
Трансформатор любого типа с соединением обмоток Y_0/Δ	x_1
Трехфазная группа из однофазных трансформаторов, трехфазный четырех- или пятистержневой трансформатор:	
с соединением обмоток Y_0/Y	∞
то же Y_0/Y_0	x_1
Трехфазный трехстержневой трансформатор:	
с соединением обмоток Y_0/Y	$x_1 + x_{\mu 0}$
то же Y_0/Y_0	По рис. 12-3, *б*

Токи коротких замыканий

Автотрансформаторы



Воздушные линии



$$D_э = \frac{2{,}085}{\sqrt{f\lambda 10^{-9}}} \cdot 10^{-3},\ м$$

$D_э = 1\,000\ м$

$$x_L = 0{,}145 \lg \frac{D_э}{r_э},\ ом/км.$$

Для витых медных проводников в зависимости от числа прядей

Для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов марки А, АС, АСО, АСУ

$r_э = (0{,}724 \div 0{,}771)r$;
$r_э = 0{,}95r$, где r — истинный радиус провода.

$$r_{ср} = \sqrt[n]{r_э a_{ср}^{n-1}}$$

$$r = r_п + r_з$$

$$r_з = \pi^2 f \cdot 10^{-4},\ ом/км$$

$r_з = 0{,}05\ ом/км.$

Токи коротких замыканий

Сопротивление, обусловленное взаимоиндукцией между двумя параллельными линиями «провод — земля» с расстоянием d между осями их проводов (если оно значительно меньше величины $D_з$), можно определить из выражения:

$$Z_м = 0{,}05 + j0{,}145 \lg \frac{D_з}{d}, \ ом/км$$

$$D_{ср} = \sqrt[3]{d_{ab} d_{ac} d_{bc}},$$

$$Z_{Мср} = 0{,}05 + j0{,}145 \lg \frac{D_з}{D_{ср}}, \ ом/км$$

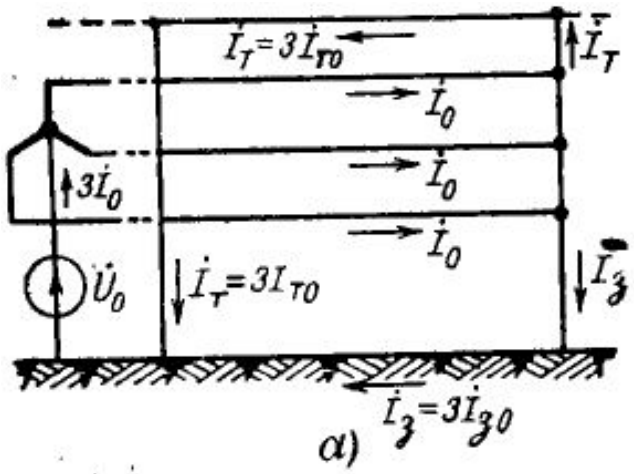
$$Z_0 = Z_L + Z_{Мср} + Z_{Мср} = L_L + 2Z_{Мср};$$

$$Z_0 = r_п + 0{,}15 + j0{,}435 \lg \frac{D_з}{R_{ср}}, \ ом/км$$

Токи коротких замыканий

Сопротивление нулевой последовательности каждой цепи двухцепной линии дополнительно увеличивается[1] благодаря взаимоиндукции с проводами параллельной цепи.

Оценим теперь влияние тросов на величину сопротивления нулевой последовательности линии. Тросы используют в качестве средства грозозащиты линии, располагая их в верхней точке опоры. До последнего времени тросы заземляли практически на каждой опоре. В образующихся при этом короткозамкнутых контурах возможно протекание наведенных токов.



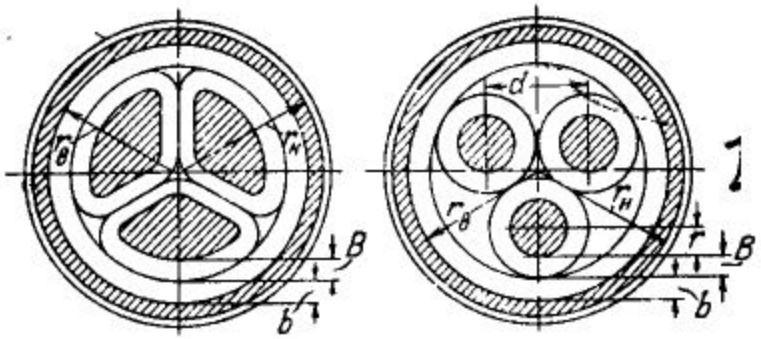
а)

Токи коротких замыканий

Средние значения соотношений между x_0 и x_1 для воздушных линий передачи

Характеристика линии	Отношение x_0/x_1
Одноцепная линия без тросов	3,5
То же со стальными тросами	3,0
То же с хорошо проводящими тросами	2,0
Двухцепная линия без тросов	5,5
То же со стальными тросами	4,7
То же с хорошо проводящими тросами	3,0

Кабели



В ориентировочных расчетах для трехжильных кабелей обычно принимают:

$$r_0 \approx 10 r_1;$$

$$x_0 \approx (3{,}5 \div 4{,}6)\, x_1.$$

Единственный путь получения надежных данных о Z_0 кабеля состоит в проведении соответствующих замеров в реальных условиях.

СХЕМЫ ОТДЕЛЬНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Началом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей; это точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности.

Концом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия. При продольной несимметрии каждая из схем имеет два конца; ими являются две точки, между которыми расположена данная продольная несимметрия. К концу или между концами схем отдельных последовательностей приложены напряжения соответствующих последовательностей, возникающие в месте несимметрии.

Токи нулевой последовательности по существу являются однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю и параллельные ей цепи. В силу этого путь циркуляции токов нулевой последовательности резко отличен от пути, по которому проходят токи прямой или обратной последовательности.

Токи коротких замыканий

Схема нулевой последовательности в значительной мере определяется соединением обмоток участвующих трансформаторов и автотрансформаторов.

Составление схемы нулевой последовательности следует начинать, как правило, от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. В зависимости от вида несимметрии это напряжение прикладывается или относительно земли (поперечная несимметрия, рис. 13-1,*а*) или

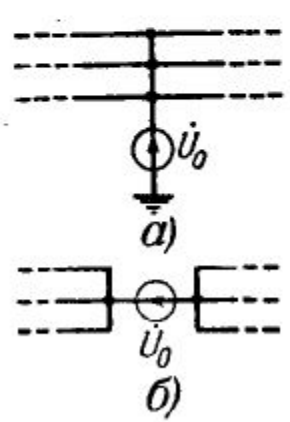


Рис. 13-1. Напряженяе нулевой последовательностя.

а — при поперечной несимметрии; *б* — при продольной иесимметрии.

последовательно, в рассечку фазных проводов (продольная несимметрия, рис. 13-1,*б*).

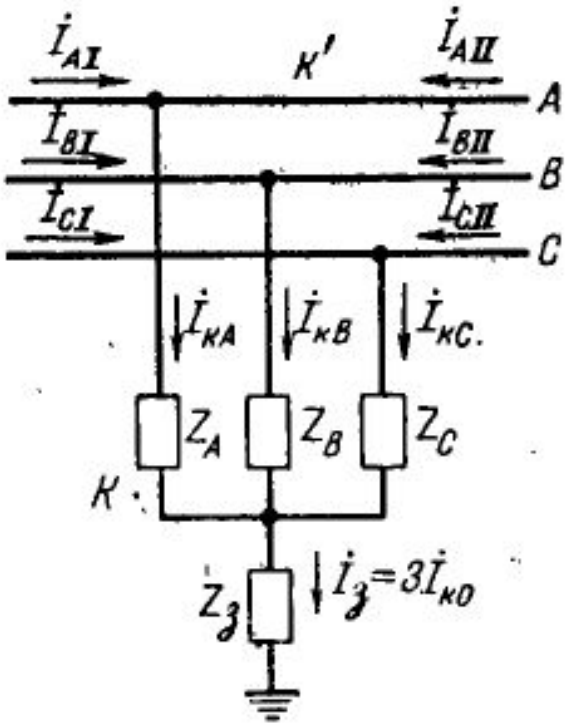
Токи коротких замыканий

Когда напряжение нулевой последовательности приложено относительно земли, то при отсутствии емкостной проводимости для циркуляции токов нулевой последовательности необходима по меньшей мере одна заземленная нейтраль в той же электрически связанной цепи, где приложено это напряжение. При нескольких заземленных нейтралях в этой цепи образуется соответственно несколько параллельных контуров для токов нулевой последовательности.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной. Это обусловлено тем, что схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а через указанное сопротивление протекает сумма токов нулевой последовательности всех трех фаз.

Токи коротких замыканий

ОДНОКРАТНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ



Токи коротких замыканий

Двухфазное короткое замыкание

$$\dot{I}^{(2)}_{кA}=0;$$

$$\dot{I}^{(2)}_{кB}=-\dot{I}^{(2)}_{кC};$$

$$\dot{U}^{(2)}_{кB}-\dot{U}^{(2)}_{кC}=0.$$

$$\dot{I}_{к0}=0$$

$$\dot{I}_{кA}=\dot{I}_{кA1}+\dot{I}_{кA2}=0,$$

$$\dot{I}_{кA1}=-\dot{I}_{кA2};$$

$$a^2\dot{U}_{кA1}+a\dot{U}_{кA2}+\dot{U}_{к0}-a\dot{U}_{кA1}-a^2\dot{U}_{кA2}-\dot{U}_{к0}=$$
$$=(a^2-a)(\dot{U}_{кA1}-\dot{U}_{кA2})=0,$$

$$\dot{U}_{кA2}=\dot{U}_{кA1};$$

$$\dot{E}_{A\Sigma}-jx_{1\Sigma}\dot{I}_{кA1}=-jx_{2\Sigma}\dot{I}_{кA2};$$

$$\dot{I}^{(2)}_{кA1}=\frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma}+x_{2\Sigma})}$$

Токи коротких замыканий

$$\dot{I}^{(2)}_{кB} = a^2 \dot{I}_{кA1} + a\dot{I}^{(2)}_{кA2} = (a^2 - a)\,\dot{I}^{(2)}_{кA1} = -j\sqrt{3}\,\dot{I}^{(2)}_{кA1}$$

$$\dot{I}^{(2)}_{кC} = j\sqrt{3}\,\dot{I}^{(2)}_{кA1}$$

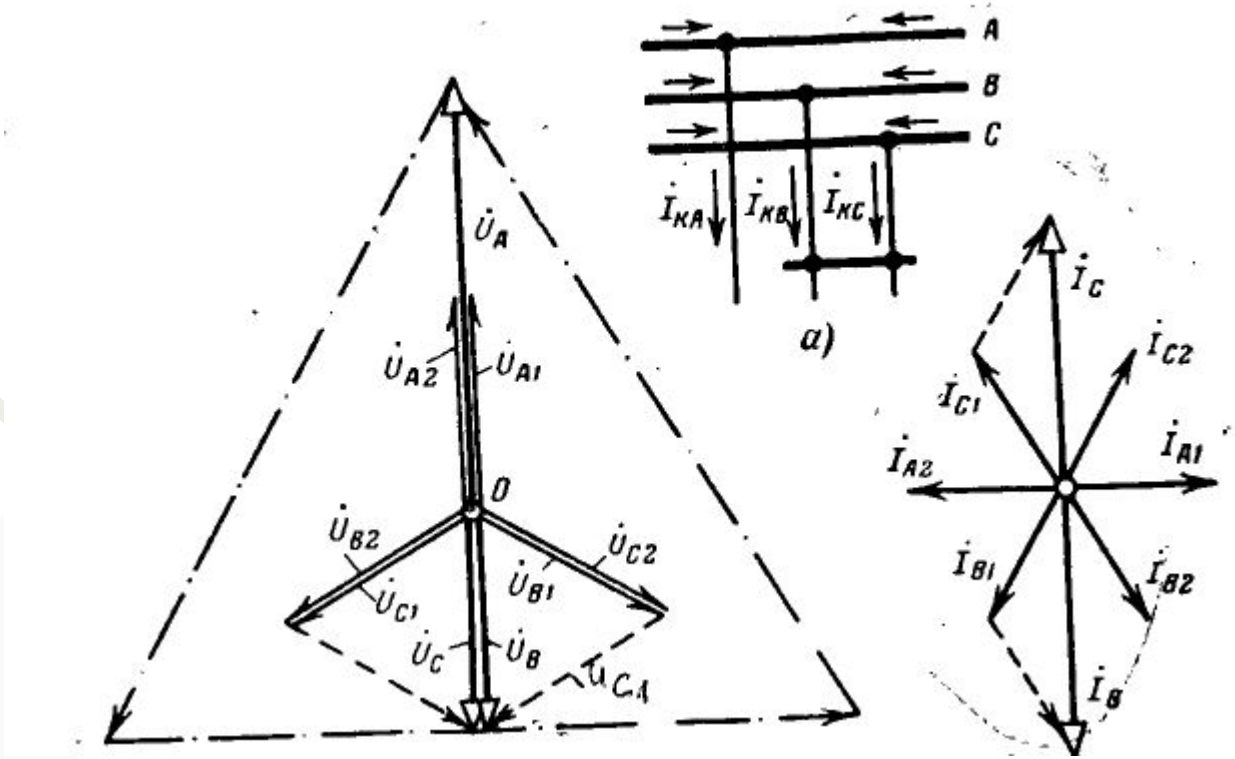
$$\dot{U}^{(2)}_{кA1} = \dot{U}^{(2)}_{кA2} = jx_{2\Sigma}\dot{I}^{(2)}_{кA1}$$

$$\dot{U}^{(2)}_{кA} = -jx_{0\Sigma}\dot{I}^{(2)}_{к0} = -\infty \cdot 0 - \text{неопределенность.}$$

$$\dot{U}^{(2)}_{кA} = \dot{U}^{(2)}_{кA1} + \dot{U}^{(2)}_{кA2} = 2\dot{U}^{(2)}_{кA1} = 2jx_{2\Sigma}\dot{I}^{(2)}_{кA1};$$

$$\dot{U}^{(2)}_{кB} = \dot{U}^{(2)}_{кC} = a^2\dot{U}^{(2)}_{кA1} + a\dot{U}^{(2)}_{кA2} = -\dot{U}^{(2)}_{кA1} = \frac{-\dot{U}^{(2)}_{кA}}{2}$$

Токи коротких замыканий



Токи коротких замыканий

Однофазное короткое замыкание

$$\dot{I}^{(1)}_{кB}=0;$$

$$\dot{I}^{(1)}_{кC}=0;$$

$$\dot{U}^{(1)}_{кA}=0.$$

$$\dot{I}^{(1)}_{кA1}=\dot{I}^{(1)}_{кA2}=\dot{I}^{(1)}_{к0}=\frac{1}{3}\dot{I}^{(1)}_{кA}$$

$$\dot{U}_{кA}=\dot{U}_{кA1}+\dot{U}_{кA2}+\dot{U}_{к0}=0,$$

$$\dot{E}_{A\Sigma}-j\dot{I}_{кA1}(x_{1\Sigma}+x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma})=0$$

$$\dot{I}^{(1)}_{кA1}=\frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma}+x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma})}$$

$$\dot{I}^{(1)}_{кA}=3\dot{I}^{(1)}_{кA1}$$

$$\dot{U}_{к0}=-jx_{0\Sigma}\dot{I}_{к0}=-jx_{0\Sigma}\dot{I}_{кA1};$$

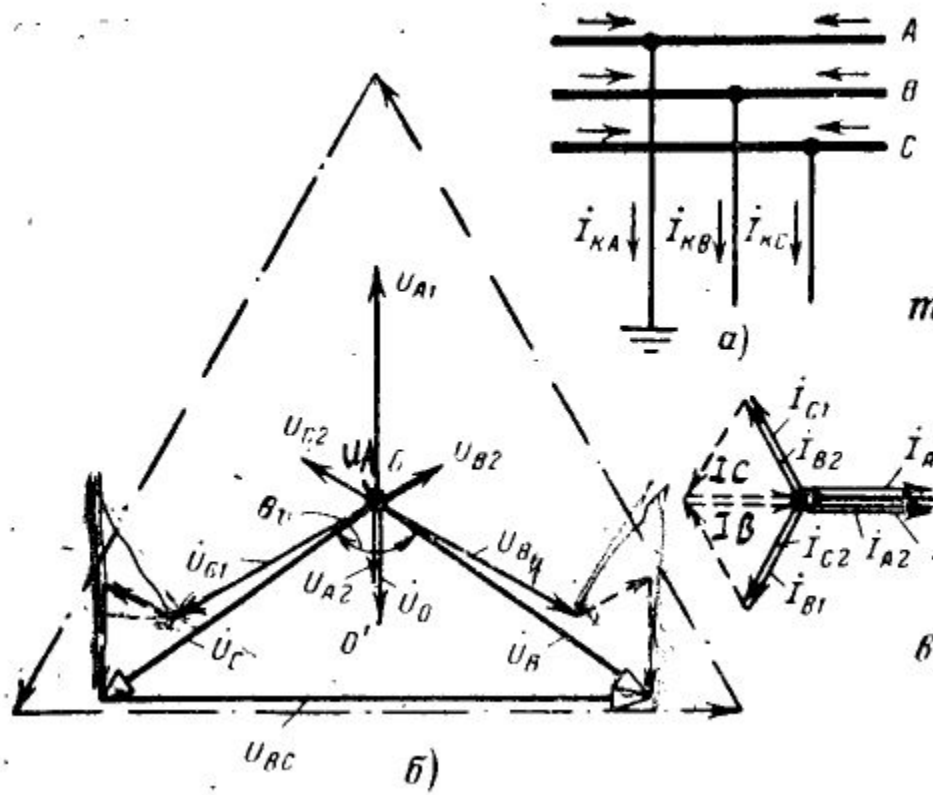
$$\dot{U}_{кA2}=-jx_{2\Sigma}\dot{I}_{кA2}=-jx_{2\Sigma}\dot{I}_{кA1};$$

$$\dot{U}_{кA1}=-(\dot{U}_{кA2}+\dot{U}_{к0})=j(x_{2\Sigma}+x_{0\Sigma})\dot{I}_{кA1}$$

$$\dot{U}^{(1)}_{кB}=a^2\dot{U}^{(1)}_{кA1}+a\dot{U}^{(1)}_{кA2}+\dot{U}^{(1)}_{к0}=j[(a^2-a)x_{2\Sigma}+(a^2-1)x_{0\Sigma}]\dot{I}^{(1)}_{кA1};$$

$$\dot{U}^{(1)}_{кC}=j[(a-a^2)x_{2\Sigma}+(a-1)x_{0\Sigma}]\dot{I}^{(1)}_{кA1}$$

Токи коротких замыканий



$$\dot{I}_{в}^{(1,1)} = 3\dot{I}_{к0}^{(1,1)}$$

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}^{''})^2}}$$

$$1{,}5 \leqslant m^{(1,1)} \leqslant \sqrt{3}$$

$$60° < \theta_I \leqslant 180°$$

$$\dot{U}_{кA}^{(1,1)} = 3\dot{U}_{кA1}^{(1,1)}$$

Токи коротких замыканий

Двухфазное короткое замыкание на землю

$$\dot{I}^{(1,1)}_{кA} = 0;$$

$$\dot{U}^{(1,1)}_{кB} = 0;$$

$$\dot{U}^{(1,1)}_{кC} = 0.$$

$$\dot{I}^{(1,1)}_{кA1} + \dot{I}^{(1,1)}_{кA2} + \dot{I}^{(1,1)}_{к0} = 0$$

$$\dot{U}^{(1,1)}_{кA1} = \dot{U}^{(1,1)}_{кA2} = \dot{U}^{(1,1)}_{к0} = \frac{1}{3}\dot{U}^{(1,1)}_{кA}$$

$$\dot{I}^{(1,1)}_{кA2}\, jx_{2\Sigma} = \dot{I}^{(1,1)}_{к0}\, jx_{0\Sigma}$$

$$\dot{I}^{(1,1)}_{к0} = -\dot{I}^{(1,1)}_{кA1}\frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$$

$$\dot{I}^{(1,1)}_{кA2} = -\dot{I}^{(1,1)}_{кA1}\frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$$

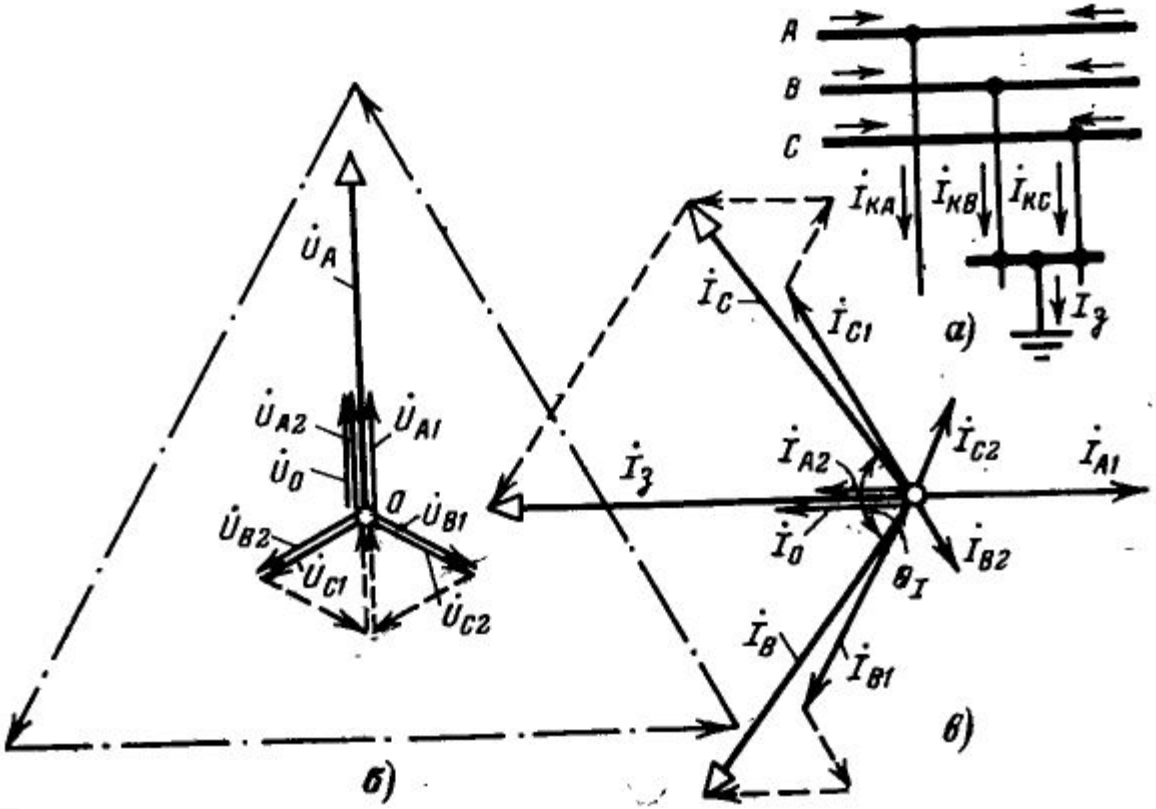
$$\dot{U}^{(1,1)}_{кA1} = \dot{E}_{A\Sigma} - \dot{I}^{(1,1)}_{кA1}\, jx_{1\Sigma} = \dot{U}^{(1,1)}_{к0} = \dot{I}^{(1,1)}_{кA1}\, j\frac{x_{2\Sigma}\, x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$$

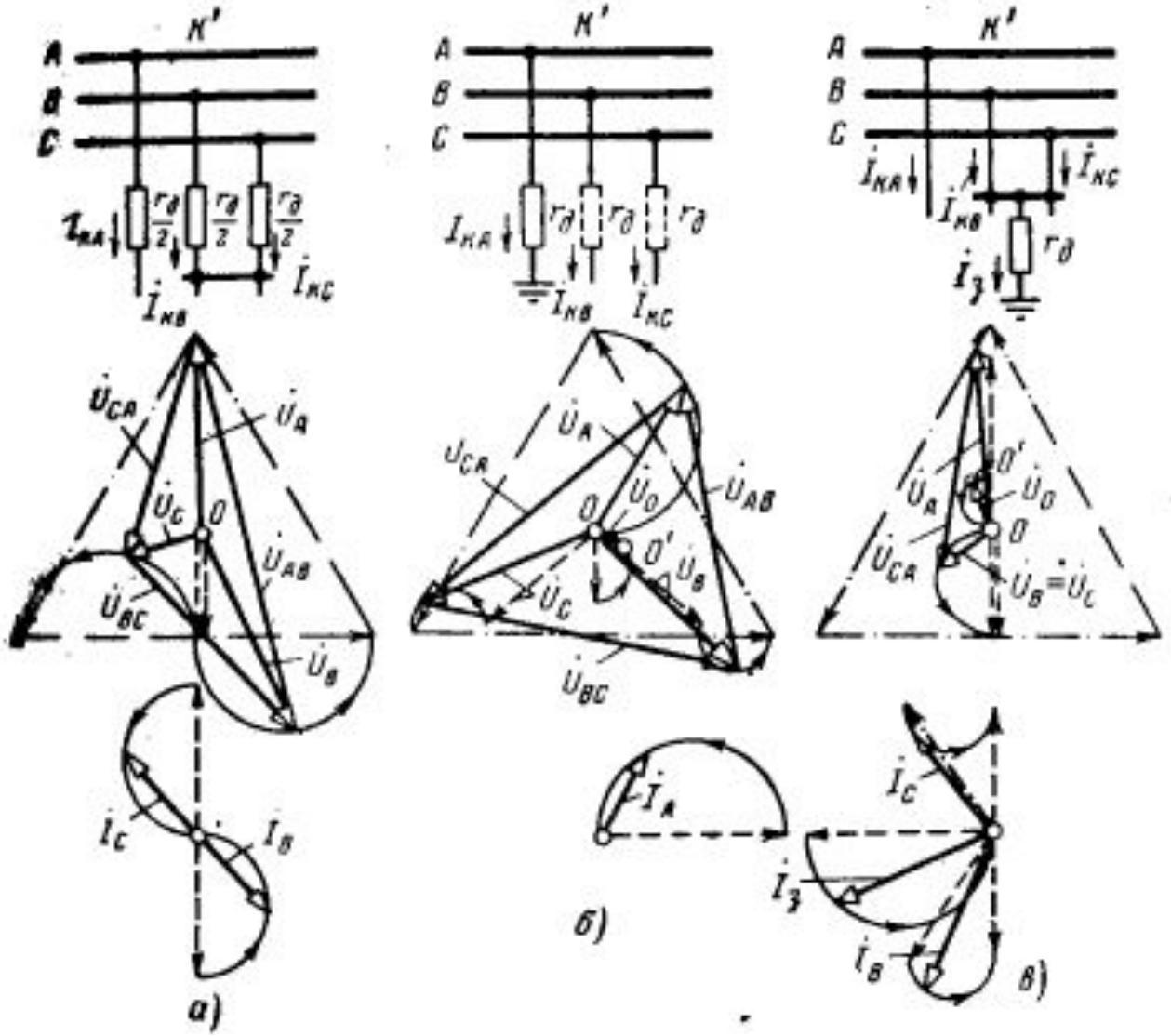
$$\dot{I}^{(1,1)}_{кA1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j\left[x_{1\Sigma} + (x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma})\right]}$$

$$\dot{I}^{(1,1)}_{кB} = \left(a^2 - \frac{x_{2\Sigma} + ax_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}\right)\dot{I}^{(1,1)}_{кA1}$$

$$\dot{I}^{(1,1)}_{кC} = \left(a - \frac{x_{2\Sigma} + a^2 x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}\right)\dot{I}^{(1,1)}_{кA1}$$

Токи коротких замыканий





Стрелки на дугах окружностей рис. указывают направления перемещения концов данных векторов при увеличении $r_д$ от нуля в пределе до бесконечности.

Правило эквивалентности прямой последовательности

Ток прямой последовательности любого несимметричного короткого замыкания может быть определен как ток при трехфазном коротком замыкании в точке, удаленной от действительной точки короткого замыкания на дополнительное сопротивление $Z_{\Delta}^{(n)}$, *которое не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида короткого замыкания определяется результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки схемы, а также в общем случае сопротивлением возникшей дуги.*

$$\dot{I}_{\text{к}A1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{jx_{1\Sigma} + Z_{\Delta}^{(n)}}$$

$$I_{\text{к}}^{(n)} = m^{(n)} I_{\text{к}1}^{(n)}$$

Токи коротких замыканий

Симметричные составляющие токов и напряжений в месте несимметричных замыканий через дугу

Определяемые величины и их обозначения		При замыканиях		
		двухфазном	однофазном	двухфазном на землю
Ток прямой последовательности	I_{A1}	$\frac{\dot{E}_A}{r_д + j(x_1 + x_2)}$	$\frac{\dot{E}_A}{3r_д + j(x_1 + x_2 + x_0)}$	$\frac{\dot{E}_A}{jx_1 + jx_2 // (3r_д + jx_0)}$
Ток обратной последовательности	I_{A2}	$-I_{A1}$	I_{A1}	$\frac{-(3r_д + jx_0)}{3r_д + j(x_2 + x_0)} I_{A1}$
Ток нулевой последовательности	I_0	0	I_{A1}	$\frac{-jx_2}{3r_д + j(x_2 + x_0)} I_{A1}$
Напряжение прямой последовательности	$\dot{U}_{A1}$	$(r_д + jx_2) I_{A1}$	$[3r_д + j(x_2 + x_0)] I_{A1}$	$[jx_2 // [3r_д + jx_0)] I_{A1}$
Напряжение обратной последовательности	$\dot{U}_{A2}$	$jx_2 I_{A1}$	$-jx_2 I_{A1}$	$\frac{jx_2(3r_д + jx_0)}{3r_д + j(x_2 + x_0)} I_{A1}$
Напряжение нулевой последовательности	$\dot{U}_0$	[Предшествующее значение	$-jx_0 I_{A1}$	$\frac{-x_2 x_0}{3r_д + j(x_2 + x_0)} I_{A1}$

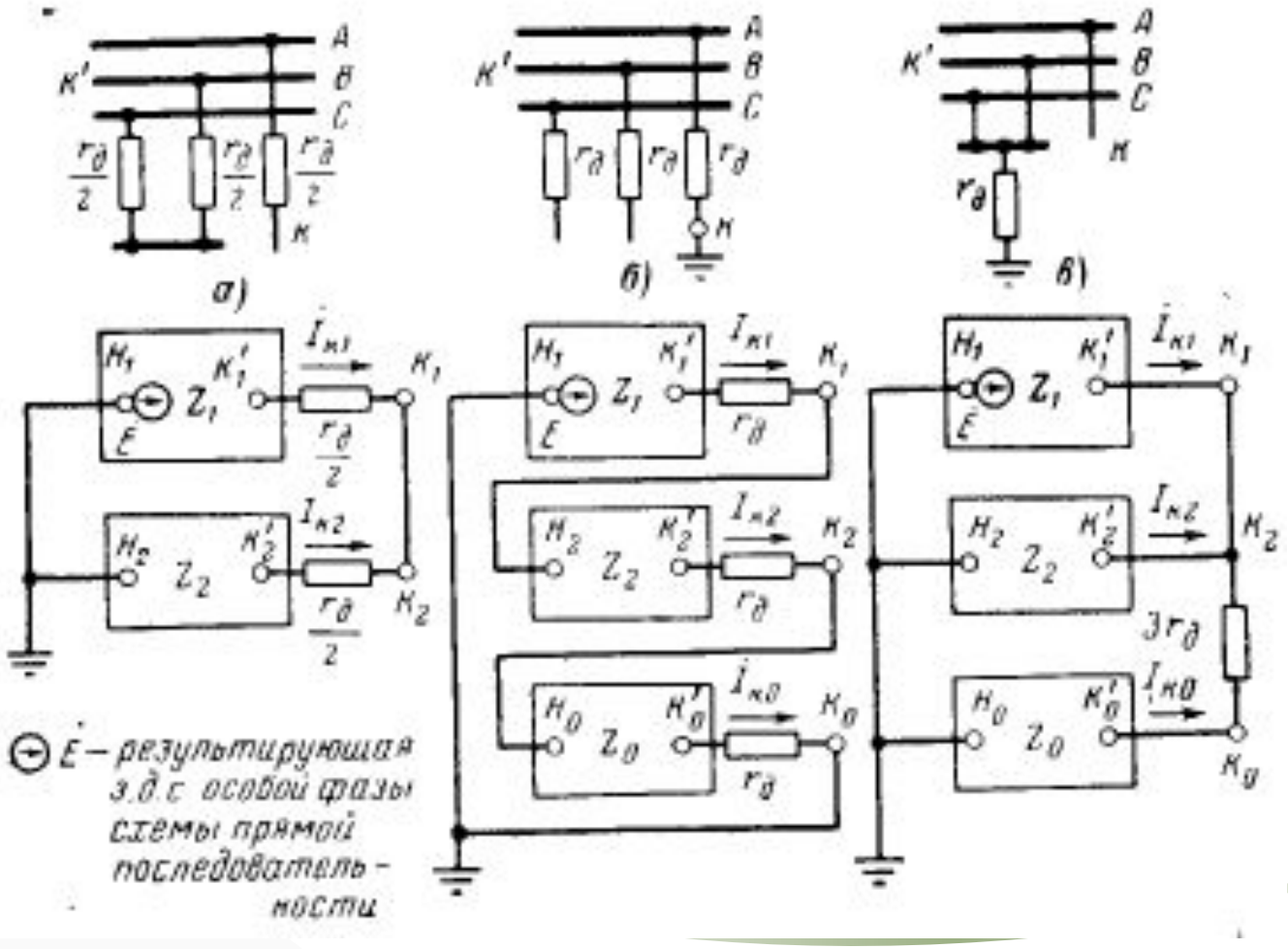
Токи коротких замыканий

Значения дополнительного сопротивления[1] $Z_{\Delta}^{(n)}$ и коэффициента $m^{(n)}$

Вид замыкания	(n)	$Z_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
Трехфазное	(3)	0	1
Двухфазное	(2)	$r_д + jx_2$	$\sqrt{3}$
Однофазное	(1)	$3r_д + j(x_2 + x_0)$	3
Двухфазное на землю	(1,1)	$jx_2 // (3r_д + jx_0)$	$\left\lvert a^2 - \frac{jx_2 + a(3r_д + jx_0)}{3r_д + j(x_2 + x_0)} \right\rvert$
То же при $r_д = 0$	(1,1)	$jx_2 // jx_0$	$\sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{x_2 x_0}{(x_2 + x_0)^2}}$

Токи коротких замыканий

Комплексные схемы замещения



Сравнение видов короткого замыкания

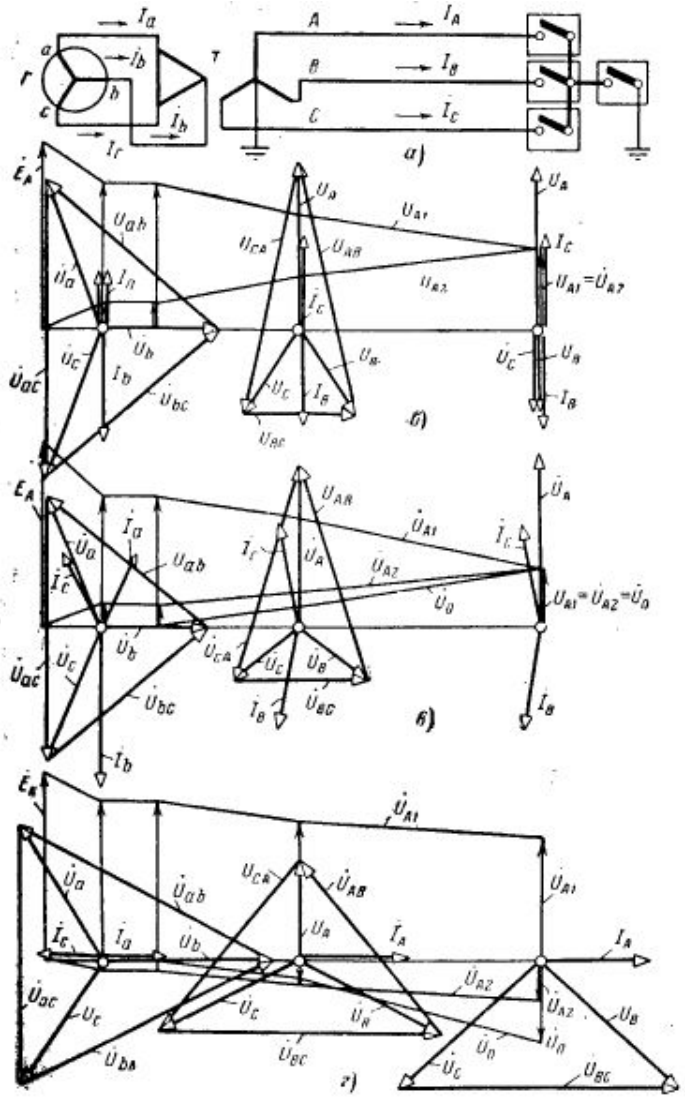
$$x_{\Delta}^{(1)} > x_{\Delta}^{(2)} > x_{\Delta}^{(1,1)} > x_{\Delta}^{(3)} = 0$$

$$I_{к1}^{(1)} < I_{к1}^{(2)} < I_{к1}^{(1,1)} < I_{к}^{(3)}$$

$$U_{к1}^{(1)} > U_{к1}^{(2)} > U_{к1}^{(1,1)} > U_{к}^{(3)} = 0.$$

Токи коротких замыканий

Векторные диаграммы токов и напряжений

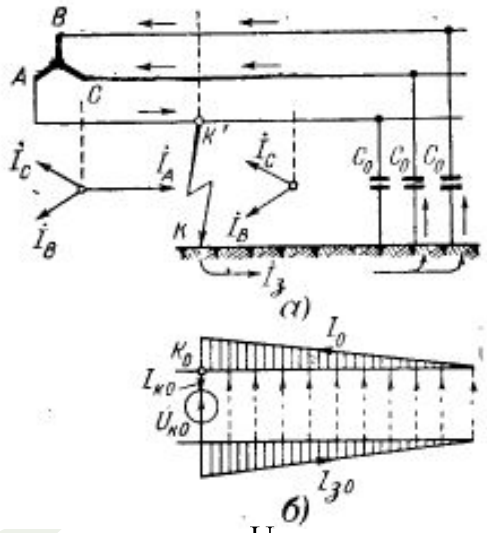


ЗАМЫКАНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ И СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Распределительные сети напряжением 3—35 *кв*, питание которых осуществляется от районных подстанций электрической системы, обычно являются второй или третьей ступенью трансформации от генераторов станций системы. Поэтому одним из характерных признаков таких сетей является их относительно большая электрическая удаленность от источников питания, в силу чего аварийные процессы, возникающие в этих сетях, сравнительно мало сказываются на работе генераторов системы. Последнее обстоятельство позволяет практически считать, что при любых нарушениях режима работы распределительной сети напряжение высшей ступени трансформации системы остается неизменным.

Токи коротких замыканий

Простое замыкание на землю



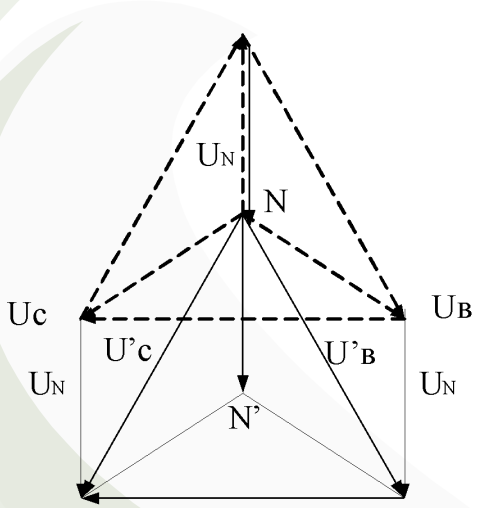
$$\dot{I}_к = 3\frac{\dot{U}_{ф.ср}}{3r_д - jx_{C0\Sigma}}$$

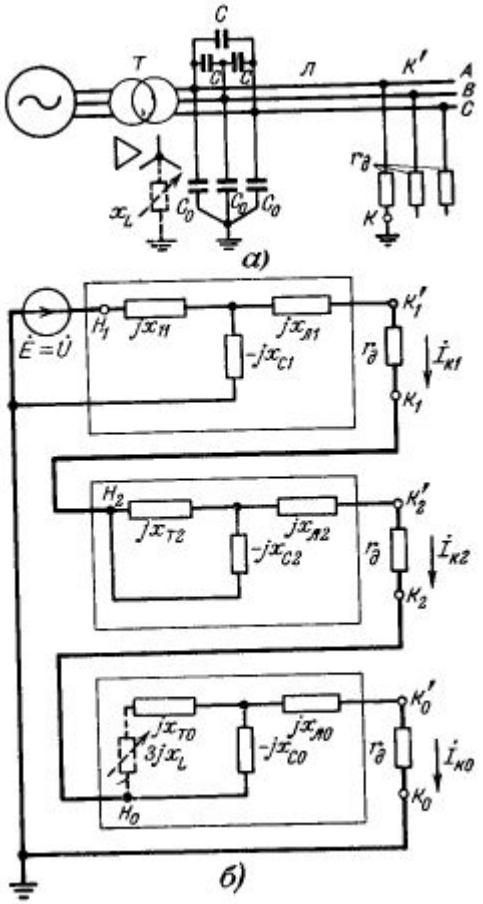
$$\dot{I}_к = 3j\frac{\dot{U}_{ф.ср}}{x_{C0\Sigma}}$$

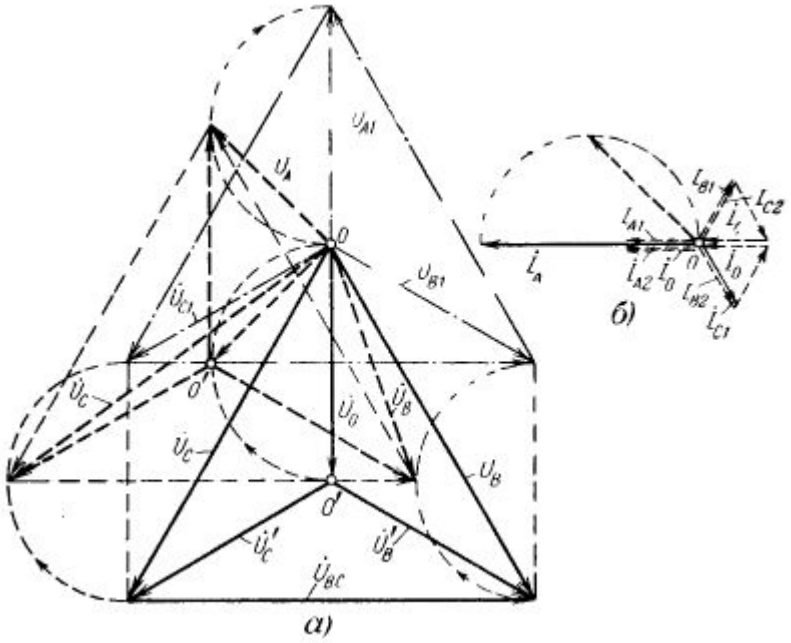
$$\dot{U}_{к'A1} = \dot{U}_{ф.ср};$$

$$\dot{U}_{к'A2} = 0;$$

$$\dot{U}_{к'0} = \frac{jx_{C0\Sigma}}{3r_д - jx_{C0\Sigma}}\dot{U}_{ф.ср}.$$




C
T
Л
K′
A
B
C
$r_д$
x_L
C_0
K
а)
$\dot{E}=\dot{U}$
H_1
$jx_н$
$jx_{л1}$
$-jx_{C1}$
K_1'
K_1
$\dot{I}_{к1}$
H_2
$jx_{т2}$
$jx_{л2}$
$-jx_{C2}$
K_2'
K_2
$\dot{I}_{к2}$
$jx_{т0}$
$3jx_L$
$jx_{л0}$
$-jx_{C0}$
K_0'
K_0
H_0
$\dot{I}_{к0}$
б)


$\dot{U}_{A1}$
$\dot{U}_1$
$\dot{U}_{B1}$
$\dot{U}_{C1}$
$\dot{U}_C$
$\dot{U}_0$
$\dot{U}_B$
$\dot{U}_C'$
$\dot{U}_B'$
$\dot{U}_{BC}$
O
O′
а)
$\dot{I}_{B1}$
$\dot{I}_{C2}$
$\dot{I}_{A1}$
$\dot{I}_1$
$\dot{I}_A$
$\dot{I}_{A2}$
$\dot{I}_0$
$\dot{I}_{B2}$
$\dot{I}_{C1}$
б)

Учет изменения параметров проводников сети

Параметры проводников сети могут в значительной мере зависеть от величины проходящего тока. Следовательно, для нахождения последней приходится решать схему с нелинейными элементами. Рассмотрим влияние двух основных факторов, вызывающих нелинейность проводников, и их практический учет.

а) Изменение параметров ферромагнитных проводников

Активное сопротивление r и внутреннее индуктивное сопротивление $x_{внут}$ (обусловленное магнитным потоком, замыкающимся в сечении самого проводника) стального провода зависят от проходящего по нему тока. Эта зависимость довольно существенна при изменении тока в некотором диапазоне, а за пределами последнего указанные сопротивления практически постоянны.

Значения расчетных параметрои стальных проводов (при токе до 200 *а*)

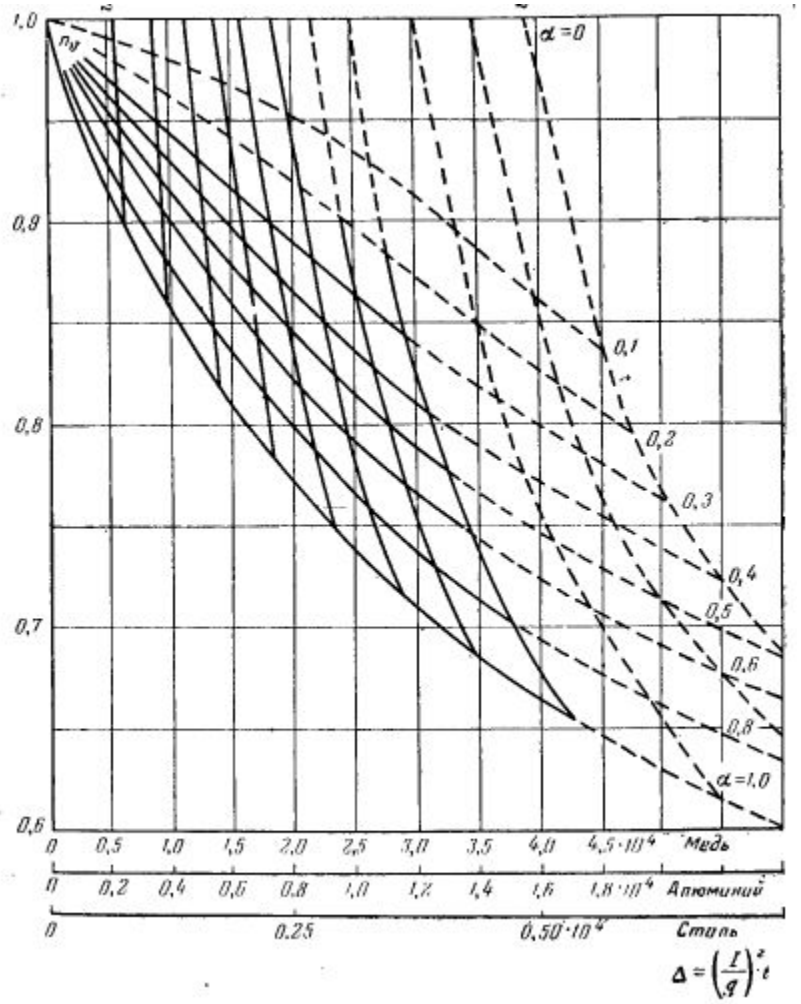
Обозначение параметра	При марке провода				
	ПС-25	ПС-35	ПС-50	ПС-70	ПС-95
z, *ом/км*	6,5	5,3	4,0	2,7	2,0
r, *ом/км*	6,1	5,0	3,76	2,54	1,88
x, *ом/км*	2,2	1,8	1,36	0,92	0,68

б) Увеличение активного сопротивления проводников от их нагрева током короткого замыкания

Когда в цепи имеется проводник, активное сопротивление которого составляет значительную часть полного сопротивления всей цепи, то при прохождении по нему большого тока короткого замыкания нагрев проводника быстро возрастает. Последнее приводит к увеличению активного сопротивления проводника, что в свою очередь вызывает снижение тока. Этот эффект так называемого теплового спада тока короткого замыкания и его практический учет впервые исследованы И. А. Сыромятниковым.

$$I_{\text{п}} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{r_{\vartheta}^2 + x_{\Sigma}^2}} = \frac{U_{\phi} n_{\vartheta}}{\sqrt{r_{\vartheta_0}^2 + x_{\Sigma}^2}} = I_{\text{п}/0/} n_{\vartheta}$$

$$n_{\vartheta} = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{п}/0/}} = \frac{1}{\sqrt{a\left(\frac{1+\alpha\vartheta}{1+\alpha\vartheta_0}\right)^2 + (1-a)}}$$



Из физической сущности явления и характера кривых рис. 17-5 следует, что тепловой спад тока короткого замыкания тем интенсивнее, чем больше плотность тока и продолжительность короткого замыкания, а также чем большую долю составляет активное сопротивление данного проводника от общего сопротивления цепи короткого замыкания. Рассматриваемый фактор особенно сказывается в достаточно протяженных кабельных сетях.

Учет местных источников и нагрузок

Расчет токов короткого замыкания в установках напряжением до 1 000 *в*

Электрические установки напряжением до 1 000 *в*, питаемые от распределительной сети электрической системы через понижающие трансформаторы, характеризуются, как правило, большой электрической удаленностью относительно источников питания. Это позволяет считать, что при коротком замыкании за таким понижающим трансформатором напряжение в точке сети, где он присоединен, практически остается неизменным и равным своему номинальному значению

Достоверность расчета токов короткого замыкания в установках напряжением до 1 000 *в* зависит главным образом от того, насколько правильно оценены и полно учтены все сопротивления короткозамкнутой цепи. Наряду с индуктивными сопротивлениями здесь весьма существенную роль играют активные сопротивления, причем последние иногда могут преобладать. Заметное влияние оказывают сопротивления таких элементов, как сборные шины и присоединения к ним, трансформаторы тока и др., которыми при выполнении аналогичных расчетов для установок высокого напряжения всегда пренебрегают. Наконец, весьма существенно здесь сказываются сопротивления различных контактных соединений — болтовых соединений шин, зажимов и разъемных контактов аппаратов и др., а также контакта непосредственно в месте происшедшего замыкания.

для круглых шин (радиусом r) $r_э = 0,78\ r$;
для полосовой шины (размерами h и b) $r_э = 0,23\ (h + b)$.
Для пакета из нескольких полос под b следует понимать толщину пакета в целом.

$$r_0 = (5 \div 14,7)\, r_1$$

$$x_0 = (7,5 \div 9,4)\, x_1.$$

ЗАМЫКАНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ И СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

По найденным результирующим сопротивлениям прямой и нулевой последовательностей относительно точки короткого замыкания $r_{1\Sigma}$, $r_{0\Sigma}$, $x_{1\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ легко определить начальное значение периодической слагающей тока:

трехфазного короткого замыкания

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3}\sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}} = \frac{U_{\text{ср}}\,(в)}{\sqrt{3}\,z_{\Sigma}\,(ом)},\ ка;$$

однофазного короткого замыкания

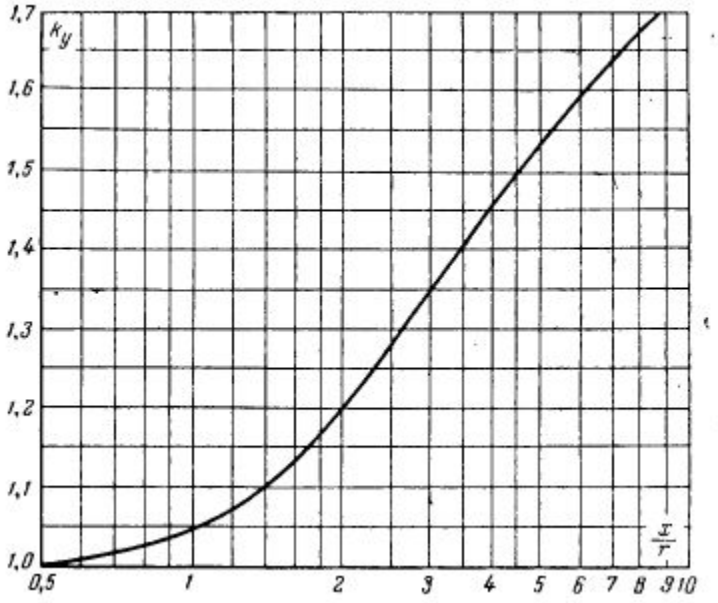
$$I_{\text{к}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}\,U_{\text{ср}}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}} = \frac{\sqrt{3}\,U_{\text{ср}}\,(в)}{z^{(1)}\,(ом)},\ ка,$$

где $U_{\text{ср}}$ — среднее номинальное напряжение той ступени, где рассматривается короткое замыкание; к этому же напряжению приведены все сопротивления цепи.

В качестве средних номинальных напряжений $U_{ср}$ для соответствующих ступеней трансформации рекомендуется принимать:

690, 525, 400, 230, 127 *в.*

$$I_{к}^{(2)} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{ТТ})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{ТТ})^2}},$$



при мощности трансформатора 20 *ква* $k_y \approx 1,05$

" " " 40—250 *ква* $k_y = 1,1 \div 1,3$

" " " 400—1 000 *ква* $k_y = 1,35 \div 1,5$

Мероприятия по ограничению токов КЗ

Требуемая степень ограничения токов КЗ определяется, в первую очередь, отключающей способностью установленных выключателей с учетом их количества и возможности модернизации. Ограничение уровня токов КЗ может определяться также необходимостью обеспечения электродинамической стойкости обмоток трансформаторов, электрической прочности кабелей связи и другими условиями.

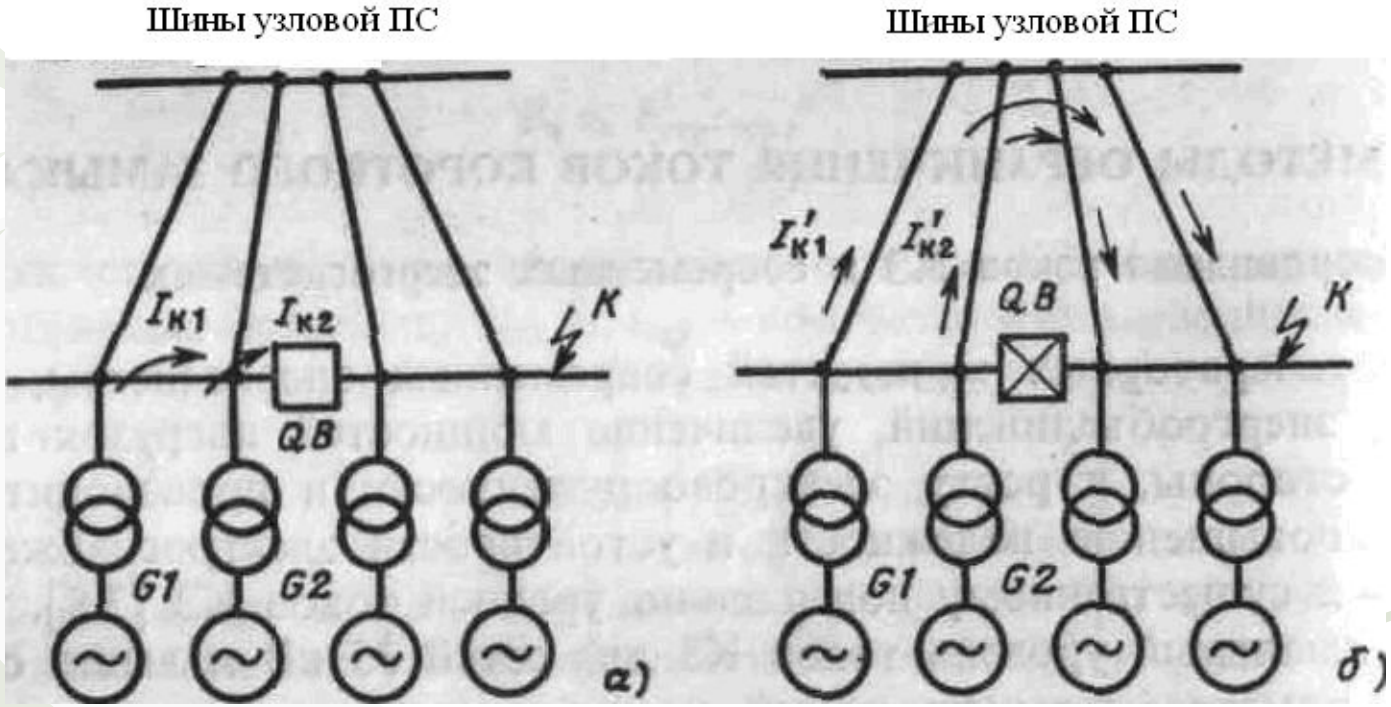
Наиболее распространенными и действенными способами ограничения токов КЗ являются: секционирование электрических сетей; установка токоограничивающих реакторов; широкое использование трансформаторов с расщепленными обмотками низшего напряжения.

СЕКЦИОНИРОВАНИЕ СЕТИ (СДС)

Первый способ является эффективным средством, которое позволяет уменьшить уровни токов КЗ в реальных электрических сетях в 1,5 – 2 раза.

Когда выключатель QB включен, ток КЗ от генераторов G1 и G2 проходит непосредственно к месту повреждения и ограничен лишь сопротивлением генераторов и трансформаторов соответствующих энергоблоков.

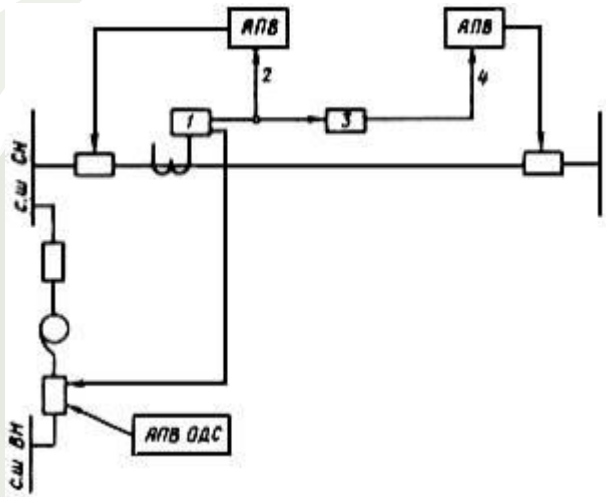
Если выключатель QB отключен, в цепь КЗ дополнительно включается сопротивление линий. Ток КЗ от генераторов G1 и G2 при этом резко снижается по сравнению с предыдущим случаем.



ОПЕРЕЖАЮЩЕЕ ДЕЛЕНИЕ СЕТИ В РЕЖИМЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ (ОДС)

При опережающем делении сети в период между возникновением и отключением короткого замыкания автоматически отключается один или несколько заранее выбранных выключателей с целью уменьшения тока короткого замыкания, а после отключения поврежденного присоединения указанные выключатели автоматически включаются. Это позволяет уменьшить ток короткого замыкания, отключаемый выключателем поврежденной цепи, при сохранении преимуществ работы замкнутой сети в нормальном режиме.

Указанная операция может быть осуществлена, как правило, без задержки отключения выключателя поврежденной цепи при использовании релейных защит с уменьшенным временем действия или выключателей с уменьшенным временем отключения.



Пример схемы опережающего деления сети выключателем автотрансформатора при использовании автоматики, исключающей АПВ линии с большой величиной тока КЗ:

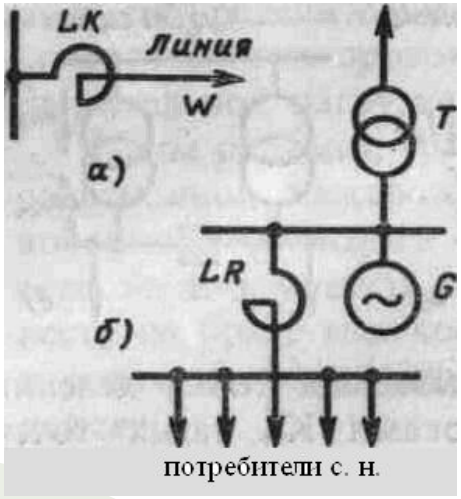
1 - контроль тока (ток КЗ превысил заданную уставку);

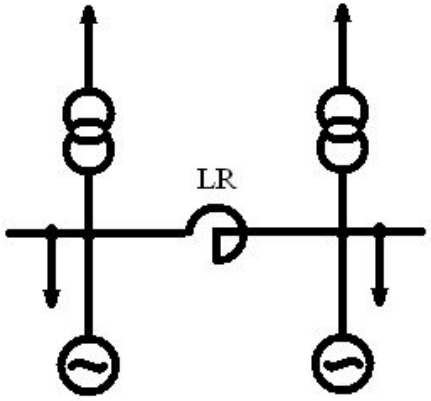
2 - блокирование пуска АПВ по условию отсутствия напряжения на линии электропередачи;

3 - устройство передачи ВЧ импульса по линии электропередачи;

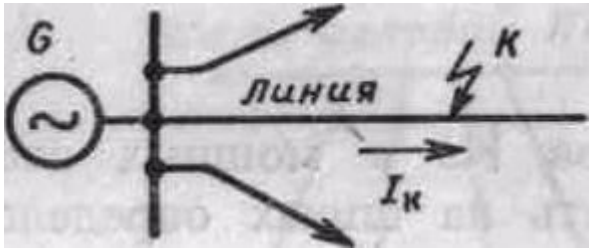
4 - разрешение пуска АПВ по условию отсутствия напряжения на линии электропередачи

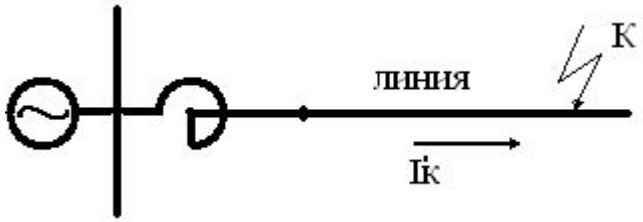
ПРИМЕНЕНИЕ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ

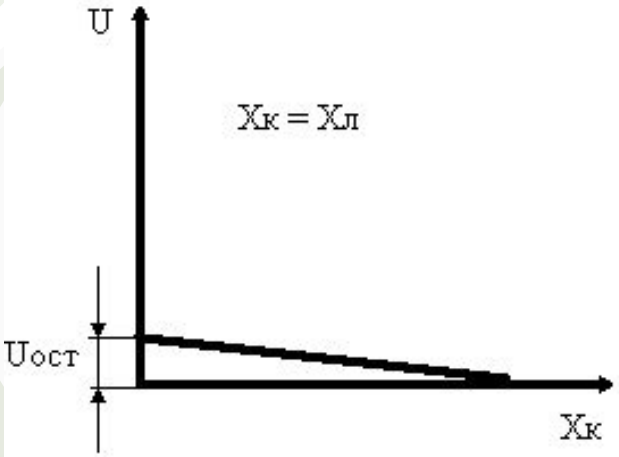




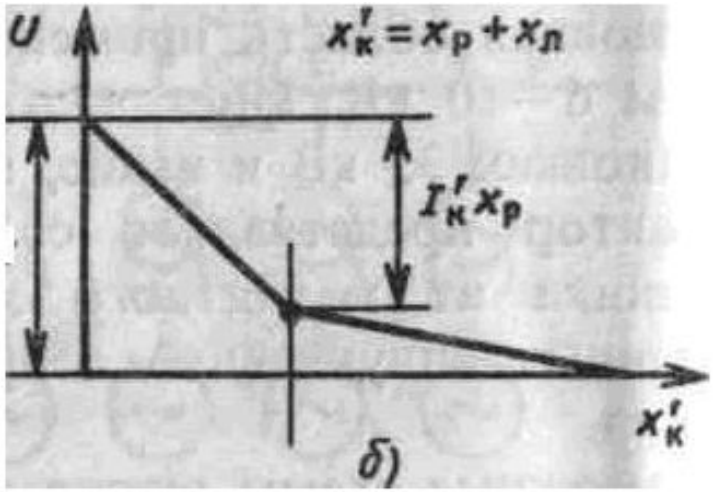
в)

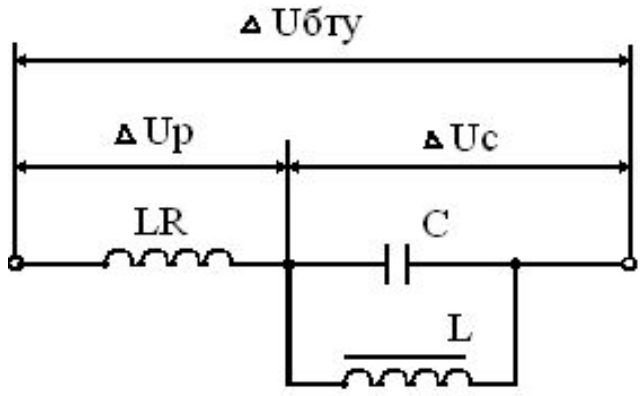






а)





Безынерционное токоограничивающее устройство

В состав БТУ входят: реактор с большим индуктивным сопротивлением, емкость, настроенная в резонанс с реактором так, чтобы результирующее сопротивление БТУ в нормальном режиме приближалось к минимально возможному. Параллельно емкости включена индуктивность в нормальном режиме с ненасыщенным ферромагнитным сердечником. Индуктивность в нормальном режиме имеет большое сопротивление, и ток через нее мал. При КЗ ток через емкость возрастает, увеличивается падение напряжения на ней, а следовательно, и напряжение на индуктивности. Последняя переходит в режим насыщения сердечника, резко уменьшает свое сопротивление и закорачивает емкость. Ток КЗ ограничивается нескомпенсированным в данном случае реактором.

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Для ограничения токов несимметричных КЗ на землю обычно разземляют нейтраль части трансформаторов на электростанции или подстанции. Этот способ наиболее прост, поэтому следует в первую очередь рассматривать возможность его применения. Недостатками такого способа токоограничения являются возможность выделения в аварийных ситуациях участков сети с недостаточной степенью заземления нейтрали, трудности с защитой изоляции нейтрали, а также недопустимость разземления нейтрали автотрансформаторов по условиям их работы.

В тех случаях, когда указанный способ применяться не может, следует рассмотреть целесообразность ограничения тока при помощи включения в нейтраль трансформатора резистора или реактора.

Заземление нейтрали трансформатора через реактор или резистор так же, как и разземление нейтрали у части трансформаторов, имеет свои преимущества и недостатки. Очевидно, что активное сопротивление резистора и индуктивное сопротивление ветви, в которую он включен, складываются геометрически, в то время как индуктивное сопротивление реактора и указанное индуктивное сопротивление ветви складываются арифметически. Поэтому для достижения одинаковой степени увеличения полного сопротивления нулевой последовательности схемы сопротивление резистора, включенного в нейтраль, должно быть больше сопротивления реактора.

Таким образом, при одной и той же величине тока КЗ напряжение на нейтрали, заземленной через резистор, будет выше, чем на нейтрали, заземленной через реактор. Это является существенным недостатком варианта заземления нейтрали через резистор. Преимуществом этого способа является то, что резистор значительно ускоряет затухание апериодической составляющей тока КЗ и тем самым ограничивает ударный ток КЗ.

Использование реактора, так же как и разземления нейтрали у части трансформаторов, позволяет ограничить ударный ток только в той степени, в какой он ограничивает периодическую составляющую тока КЗ. Преимуществом заземления нейтрали трансформатора через реактор является значительно большее ограничение периодической составляющей тока КЗ при том же напряжении на нейтрали трансформатора. Однако нейтраль трансформатора, заземленная через реактор, с точки зрения грозовых перенапряжений является изолированной и требует специальной защиты, в то время как грозозащита нейтрали, заземленной через резистор, осуществляется самим резистором.