Переходные процессы в электроэнергетических системах

Особенности и принципы выполнения практических расчетов переходных процессов КЗ. Начальный момент времени, Установившийся режим, Переходный режим. Периодическая и апериодическая составляющие тока КЗ. Система относительных единиц. Приведение магнитосвязанных цепей к одному уровню напряжения. Схемы замещения элементов систем электроснабжения для симметричных режимов работы.

лектор

Беспалов Александр Владимирович

Ток в месте короткого замыкания – суммарный ток всех ветвей электроустановки, сходящихся в точке короткого замыкания.

Расчетные условия короткого замыкания элемента электроустановки – наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия, в которых может оказаться рассматриваемый элемент электроустановки при различного вида коротких замыканиях.

Мгновенное значение тока короткого замыкания в электроустановке

Периодическая составляющая тока короткого замыкания в электроустановке

Апериодическая составляющая тока короткого замыкания в электроустановке

$$i_{Kt} = i_{\Pi t} + i_{At} = \sqrt{2} I_{\Pi t} \sin\left(\omega t - {}^{\pi}/_{2}\right) + \sqrt{2} I_{\Pi 0} e^{-\frac{t}{T_{АЭ}}}$$

Действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания рабочей частоты в электроустановке

Начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания рабочей частоты в электроустановке/

Постоянная времени апериодической составляющей тока короткого замыкания рабочей частоты в электроустановке

Простые стандартные расчеты

1) Расчет начальной периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в сетях выше 1000 В;
2) Расчет ударного тока и апериодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в сетях выше 1000 В;
3) Расчет периодической составляющей в произвольный момент времени для тока трехфазного короткого замыкания в сетях выше 1000 В;
4) Расчет начальной периодической составляющей тока несимметричного короткого замыкания в сетях выше 1000 В;
5) Расчет начальных значений токов короткого замыкания в сетях ниже 1000 В.

Сложные стандартные расчеты

1) Расчет однократной продольной несимметрии (обрывы фаз, несимметрия промежуточных элементов) в сетях выше 1000 В;
2) Расчет сложных несимметрий (двойное замыкание на землю, короткое замыкание с обрывом фазы) в сетях выше 1000 В;
3) Расчет периодической составляющей в произвольный момент времени с учетом дуги, нагрева проводников и эффекта вытеснения тока;
4) Расчет короткого замыкания в сетях постоянного тока.

Нестандартные расчеты

1) Расчет восстанавливающегося напряжения на контактах выключателей.
2) Расчет коротких замыканий в цепях с распределёнными параметрами.
3) Расчет коротких замыканий в цепях с ёмкостными сопротивлениями

Расчет начальной периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в сетях выше 1000 В

Основные допущения, принимаемые при решении большинства практических задач:

1) не учитывать сдвиг по фазе ЭДС различных синхронных машин и изменение их частоты вращения, если продолжительность КЗ не превышает 0,5 с;

2) не учитывать межсистемные связи, выполненные с помощью электропередачи (вставки) постоянного тока;

3) не учитывать поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и напряжением 330-500 кВ, если их длина не превышает 150 км;

4) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;

5) не учитывать ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;

6) не учитывать влияние активных сопротивлений различных элементов исходной расчетной схемы на амплитуду периодической составляющей тока КЗ, если активная составляющая результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно точки КЗ не превышает 30 % от индуктивной составляющей результирующего эквивалентного сопротивления;

7) приближенно учитывать затухание апериодической составляющей тока КЗ, если исходная расчетная схема содержит несколько независимых контуров;

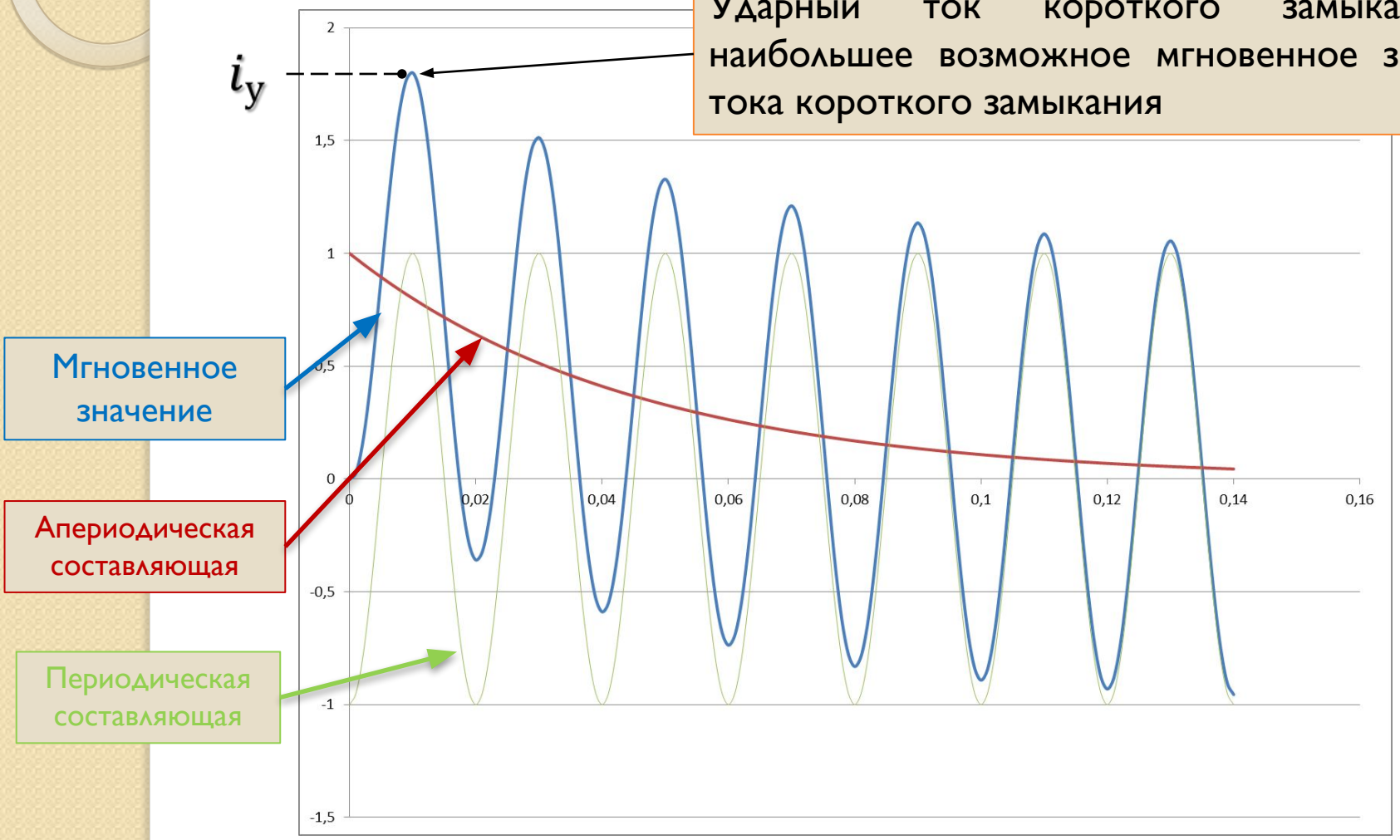
8) приближенно учитывать электроприемники, сосредоточенные в отдельных узлах исходной расчетной схемы;

9) принимать численно равными активное сопротивление и сопротивление постоянному току любого элемента исходной расчетной схемы.

10) наиболее удаленную от расчетной точки КЗ часть электроэнергетической системы допускается представлять в виде одного источника энергии с неизменной по амплитуде ЭДС и результирующим эквивалентным индуктивным сопротивлением.

$$i_{Kt} = \sqrt{2} I_{П0} \sin\left(\omega t - {}^{\pi}/_{2}\right) + \sqrt{2} I_{П0} e^{-\frac{t}{T_{АЭ}}}$$

Ударный ток короткого замыкания - наибольшее возможное мгновенное значение тока короткого замыкания



Относительное значение какой-либо величины - это ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения. Единицы измерения в данном случае называются *базисные единицы*.

$$S_* = S/S_Б \qquad U_* = U/U_Б \qquad I_* = I/I_Б \qquad Z_* = Z/Z_Б$$

Базисные условия: согласованная система базисных единиц

Базисные условия для трехфазной системы

$$S_Б = \sqrt{3}U_Б I_Б$$

$$Z_Б = \frac{U_Б}{\sqrt{3}I_Б} = \frac{U_Б^2}{S_Б}$$

$$I_* = I/I_Б = I\frac{\sqrt{3}U_Б}{S_Б}, Z_* = Z/Z_Б = Z\frac{\sqrt{3}I_Б}{U_Б} = Z\frac{S_Б}{U_Б^2}$$

Базисные условия служат для измерения, как полных величин, так и их составляющих (активных, реактивных и др.)

$$P_* = P/S_Б \qquad Q_* = Q/S_Б \qquad Z_* = Z/Z_Б \qquad X_* = X/Z_Б \qquad R_* = R/Z_Б$$

Если рассматривается одно устройство и базисные условия не указаны, то в качестве базисных используются его номинальные условия.

$$U_{*(H)} = U/U_H \qquad S_{*(H)} = S/S_H \qquad Z_{*(\mathrm{H})} = Z/Z_{\mathrm{H}} = Z\frac{\sqrt{3}I_{\mathrm{H}}}{U_{\mathrm{H}}} = Z\frac{S_{\mathrm{H}}}{U_{\mathrm{H}}^2} \qquad I_{*(H)} = I/I_H = I\frac{\sqrt{3}U_H}{S_H}$$

Пересчет на базисные условия из номинальных

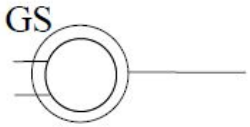
$$U_* = U_{*(н)}\frac{U_H}{U_Б} \qquad I_* = I_{*(н)}\frac{I_H}{I_Б} = I_{*(н)}\frac{S_H}{S_Б}\frac{U_Б}{U_H} \qquad Z_* = Z_{*(н)}\frac{Z_H}{Z_Б} = Z_{*(н)}\frac{S_Б}{S_H}\left(\frac{U_H}{U_Б}\right)^2$$

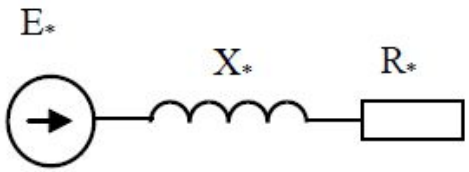
В относительных единицах можно выражать любые величины
Для определения базисных величин используются физические законы

$$\omega_* = \frac{\omega}{\omega_C} = \frac{\omega}{\omega_б} \qquad L_* = \frac{Z_б}{\omega_C} = \frac{Z_б}{\omega_б} \qquad \Psi_* = \Psi\frac{\omega_Б}{U_Б} \qquad M_* = M\frac{\omega_Б}{S_Б}$$

Многие относительные единицы различных физических величин численно равны между собой, например (при $\omega=\omega_c$) $X_*=L_*$, $E_*=\Psi_*=F_*$ и т.д.

Синхронный генератор





Паспортные данные, использованные в формулах:

U_H – номинальное напряжение генератора, кВ;

X''_d - сверхпереходное индуктивное сопротивление синхронного генератора, о.е.;

S_H – номинальная полная мощность генератора, МВА;

X_2 – индуктивное сопротивление обратной последовательности, о.е.;

$T_a^{(3)}$ - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока статора при трехфазном КЗ на выводах машины

Индуктивное сопротивление синхронного генератора (о.е.):

$$X_* = X''_d \frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2$$

Активное сопротивление синхронного генератора (о.е.):

$$R_* = \frac{X_2}{\omega T_a^{(3)}} \frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2 .$$

Синхронный генератор

ЭДС для расчета начального тока режима короткого замыкания

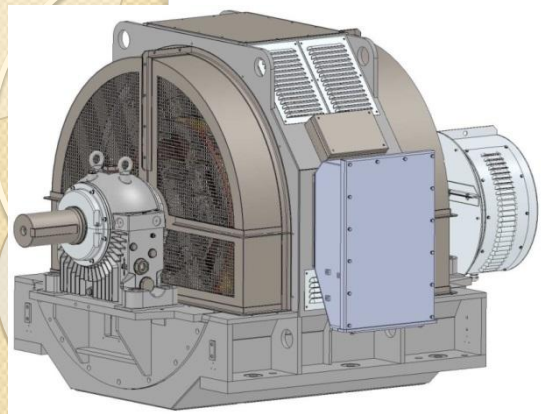
$$E_* = \frac{U_Н}{U_Б}\sqrt{\left(U_{0*} \pm I_{0*}X''_d \sin\varphi_0\right)^2 + \left(I_{0*}X''_d \cos\varphi_0\right)^2}$$

где U_{0*}, о.е. – напряжение на выводах генератора в предшествующем режиме;
I_{0*}, о.е. – ток (загрузка) генератора в предшествующем режиме;
$cos\varphi_0$, – коэффициент мощности генератора в предшествующем режиме.

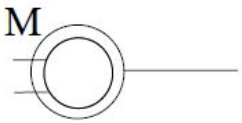
Знак «+» используется, если генератор находится в режиме перевозбуждения (отдает в сеть реактивную мощность),
знак «-» - в режиме недовозбуждения (потребляет из сети реактивную мощность)

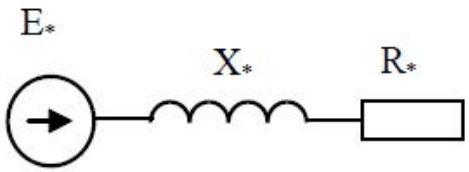
Если параметры предшествующего режима неизвестны, допускается использовать параметры номинального режима: U_{0*}=1, I_{0*}=1, $cos\phi_0$= $cos\phi_Н$. При этом предполагают, что генератор работает в режиме перевозбуждения (знак «+»).

Ориентировочные значения: $E_{*СГ(Н)}$=1,2; $X''_{dСГ}$=0,22; $R_{*СГ(Н)}$=0,0025.



Синхронный двигатель





Паспортные данные, формулы расчета параметров начального режима к.з. такие же, как для синхронного генератора.

Ориентировочные значения: $E_{*СД(Н)}=1{,}07$; $X_{*СД(Н)}=0{,}15$; $R_{*СД(Н)}=0{,}04$.

Схема замещения в начальный момент пуска

$$X_* = \frac{1}{I_{П*}} \frac{S_Б}{S_Н} \left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2$$

$I_{п*}$ - кратность пускового тока при асинхронном пуска

Асинхронный двигатель

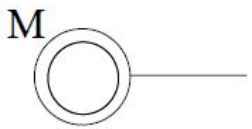


Схема замещения в начальный момент к.з.

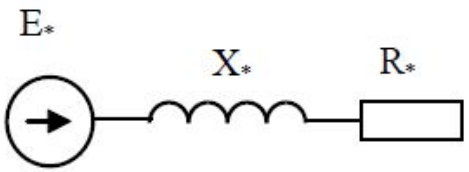


Схема замещения в начальный момент пуска

Паспортные данные, использованные в формулах:

$I_{П*}$ - кратность пускового тока (отношение пускового тока к номинальному), о.е.;

$U_Н$ – номинальное напряжение, кВ;

$s_Н$ – номинальное скольжение, о.е.

ЭДС асинхронного двигателя:

$$E_* = \frac{U_Н}{U_Б}\sqrt{\left(U_{0*} - \frac{I_{0*}}{I_{П*}}\sin\varphi_0\right)^2 + \left(\frac{I_{0*}}{I_{П*}}\cos\varphi_0\right)^2},$$

где U_{0*}, о.е. – напряжение на выводах двигателя в предшествующем режиме;

I_{0*}, о.е. – ток (загрузка) двигателя в предшествующем режиме;

$\cos\boldsymbol{\varphi}_0$, – коэффициент мощности в предшествующем режиме.

Если параметры предшествующего режима неизвестны, допускается использовать параметры номинального режима: $U_{0*}=1$, $I_{0*}=1$, $\cos\boldsymbol{\varphi}_0 = \cos\boldsymbol{\varphi}_Н$.

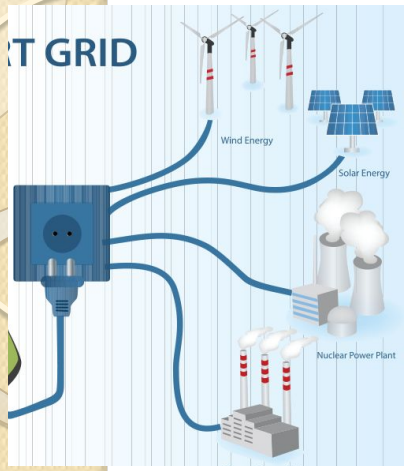
Индуктивное сопротивление асинхронного двигателя (о.е.):

$$X_* = \frac{1}{I_{П*}}\frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2$$

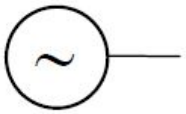
Активное сопротивление асинхронного двигателя (о.е.):

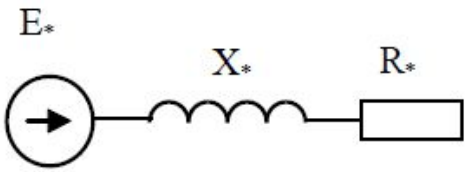
$$R_* = s_Н\frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2.$$

Ориентировочные значения: $E_{*АД(Н)}=0{,}93$; $X_{*АД(Н)}=0{,}17$; $R_{*АД(Н)}=0{,}01$.



Система – удаленный источник





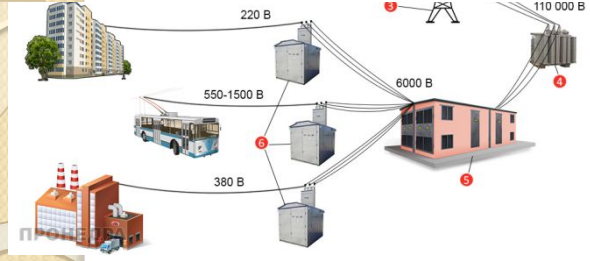
Наиболее удаленную от расчетной точки КЗ часть электроэнергетической системы допускается представлять в виде одного источника энергии с неизменной по амплитуде ЭДС и результирующим эквивалентным индуктивным сопротивлением. ЭДС этого источника следует принимать равной среднему номинальному напряжению сети, связывающей удаленную и остальную части электроэнергетической системы, а его результирующее эквивалентное сопротивление *Xc* определять, исходя из известного тока *Ic* от эквивалентируемой части системы при КЗ в какой-нибудь узловой точке указанной сети:

$$E = U_{СР.Н},\ \text{кВ};\quad E_* = \frac{U_{СР.Н}}{U_Б}\ \text{о. е.}$$

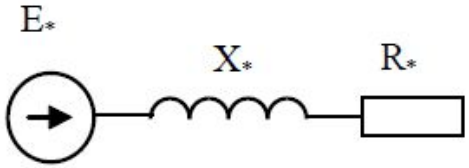
$$X_{*c} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3}\, I_c}\frac{S_Б}{U_Б^2}$$

$$R_{*c} = \frac{X_{*c}}{(X/R)}$$

Соотношение (X/R) определяется по справочным данным

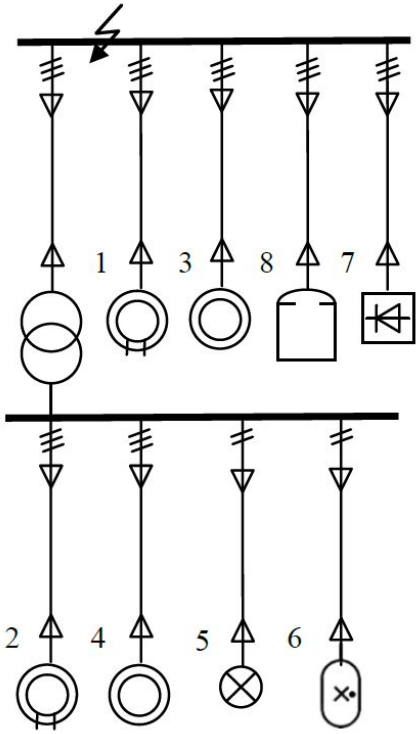


Комплексная нагрузка



При расчетах токов КЗ следует учитывать влияние каждой комплексной нагрузки, если ток в месте КЗ от той нагрузки составляет не менее 5% тока в месте КЗ, определенного без учета нагрузки.

Потребители комплексной нагрузки	Значение эквивалентной ЭДС	cos φ	Сопротивление, отн.ед.	
			прямой последовательности	обратной последовательности
Синхронные двигатели напряжением свыше 1 кВ	1,074	0,9	0,04 + *j*0,15	0,04 + *j*0,15
Синхронные двигатели напряжением до 1 кВ	1,079	0,9	0,03 + *j*0,16	0,03 + *j*0,16
Асинхронные двигатели напряжением свыше 1 кВ	0,93	0,87	0,01 + *j*0,17	0,01 + *j*0,17
Асинхронные двигатели напряжением до 1 кВ	0,9	0,8	0,07 + *j*0,18	0,07 + *j*0,18
Лампы накаливания	0	1,0	1,0	1,33
Газоразрядные источники света	0	0,85	0,85 + *j*0,53	0,382 + *j*0,24
Преобразователи	0	0,9	0,9 + *j*0,45	1,66 + *j*0,81
Электротермические установки	0	0,9	1 + *j*0,49	0,4 + *j*0,2



Комплексная нагрузка

№ п/п	Отрасль народного хозяйства	Состав потребителей узла комплексной нагрузки, %								
		СД высоковольтн.	АД высоковольтн.	АД низковольтн.	Электрическое освещение	Электротермич. установки	Электросварочн. установки	Преобразователи	Прочая нагрузка	Итого, %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Черная металлургия	25	8	29,5	2,5	22	3	10	–	100
2.	Цветная металлургия	10	5	27,5	1,5	10	–	46	–	100
3.	Горнорудная	21	21	47	5	–	–	–	6	100
4.	Химия*	35±7	15±6	29±8	2±0,4	3±0,2	1±0,05	10±2	–	100
5.	Тяжелое транспортное и энергетическое машиностроение	10	8	47	7	20	5	3	–	100
6.	Электротехническая	7	8,5	36	6,5	36	4	2	–	100
7.	Сельскохозяйственное машиностроение	5	4	38	5	42	6	–	–	100
8.	Автомобилестроение	9	10	48	5	19	3	6	–	100
9.	Машиностроение	8	5	52	5	13	14	3	–	100
10.	Коммунально-бытовая (большой город)	50	10	15	25	–	–	–	–	100
11.	Нефтедобыча	3	48	30	5	–	–	–	9	100
12.	Электротяга	–	–	5	5	–	–	90	–	100
13.	Целлюлозно-бумажная	8	12	75	8	1	–	–	1	100
14.	Нефтепереработка	26	18	50	2	–	–	–	4	100
15.	Бытовая	–	–	35	65	–	–	–	–	100
16.	Газовая, ас. привод	–	98	–	2	–	–	–	–	100
17.	Газовая, синх. привод	98	–	–	2	–	–	–	–	100
18.	Сельскохозяйственная	–	–	70	30	–	–	–	–	100
19.	Легкая	–	–	78	12	5	–	–	–	100
20.	Угледобыча шахтная	4	7	67	15	–	–	7	–	100
21.	Угледобыча открытая	60	–	30	5	–	–	–	5	100
22.	Пищевая	–	–	91,5	6	1,5	–	1	–	100
23.	Приборостроение	–	–	61	10	28	–	1	–	100
24.	Энергосистема 1	7	4	56	20	3	–	3	7	100
25.	Энергосистема 2	22	11	38	9	4	–	12	4	100
26.	Энергосистема 3	15	11	32	20	7	–	15	–	100

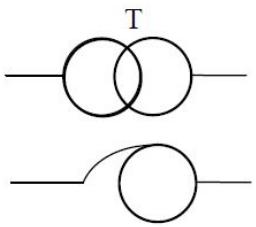
В общем случае ток КЗ от комплексной нагрузки следует определять как геометрическую сумму токов от отдельных ее элементов.

При отсутствии достоверных данных об относительном составе потребителей комплексной нагрузки можно использовать типовой состав нагрузки отдельных отраслей, выраженный в процентах от суммарной установленной мощности узла.

$$E_{НГ} = \left| \frac{\underline{Z}_{1НГ}}{S_{\Sigma}} \sum_{i=1}^{5} \frac{E_i S_i}{\underline{Z}_{1i}} \right|$$

$$\underline{Z}_{1НГ} = \frac{S_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^{5} \frac{S_i}{R_{1i} + jX_{1i}}} =$$

Двухобмоточный трансформатор (автотрансформатор)



Паспортные данные, использованные в формулах:

- номинальная мощность S_H, МВА (перевести, если дано в кВА);
- номинальные напряжения обмоток (высшего и низшего напряжений) $U_{ВН}$, $U_{НН}$, кВ;
- напряжения короткого замыкания между обмотками U_K, %;
- потери короткого замыкания P_K (ΔP_K), МВт (перевести, если дано в кВт).

Индуктивное сопротивление трансформатора (о.е.):

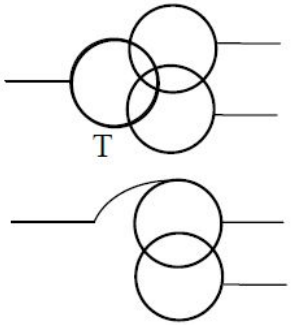
$$X_* = \frac{U_{K\%}}{100}\frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2$$

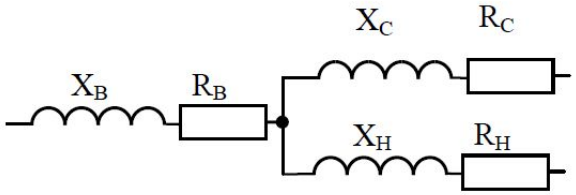
Активное сопротивление трансформатора (о.е.):

$$R_* = \frac{P_K}{S_Н}\frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2$$

Ориентировочные значения: $U_К$=10%; при $U_{ВН}$=35кВ - $X/R = 7$, при $U_{ВН}$=110кВ - $X/R = 22$, при $U_{ВН}$=220кВ - $X/R = 28$.

Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)





Паспортные данные, использованные в формулах:

- номинальная мощность S_H, МВА (перевести, если дано в кВА);
- номинальная мощность обмотки НН S_{HH}, МВА (перевести, если дано в кВА);
- номинальные напряжения обмоток (высшего, среднего и низшего напряжений) $U_{ВН}$, $U_{СН}$, $U_{НН}$, кВ;
- напряжения короткого замыкания между обмотками (попарно) $U_{КВ\text{-}С}$, $U_{КВ\text{-}Н}$, $U_{КС\text{-}Н}$,%;
- потери короткого замыкания (попарно) $\Delta P_{КВ\text{-}С}$, $\Delta P_{КВ\text{-}Н}$, $\Delta P_{КС\text{-}Н}$, МВт (перевести, если дано в кВт).

Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)

Индуктивные сопротивления обмоток трансформатора (о.е.):

$$\left.\begin{aligned} X_{*B} &= 0{,}005(U_{кB-H} + U_{кB-C} - U_{кC-H})\frac{S_Б}{S_H}\left(\frac{U_H}{U_Б}\right)^2 \\ X_{*C} &= 0{,}005(U_{kB-C} + U_{kC-H} - U_{kB-H})\frac{S_Б}{S_H}\left(\frac{U_H}{U_Б}\right)^2 \\ X_{*H} &= 0{,}005(U_{kB-H} + U_{кC-H} - U_{kB-C})\frac{S_Б}{S_H}\left(\frac{U_H}{U_Б}\right)^2 \end{aligned}\right\}$$

значение X_{*C} может быть равно нулю или меньше нуля

Активные сопротивления обмоток трансформатора (о.е.):

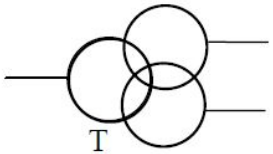
$$\left.\begin{aligned} R_{*B} &= \frac{1}{2S_H}(\Delta P_{кB-C} + \Delta P_{кB-H} - \Delta P_{кC-H})\frac{S_Б}{S_H}\left(\frac{U_H}{U_Б}\right)^2 \\ R_{*C} &= \frac{1}{2S_H}(\Delta P_{кB-C} + \Delta P_{кC-H} - \Delta P_{кB-H})\frac{S_Б}{S_H}\left(\frac{U_H}{U_Б}\right)^2 \\ R_{*H} &= \frac{1}{2S_H}(\Delta P_{кB-H} + \Delta P_{кC-H} - \Delta P_{кB-C})\frac{S_Б}{S_H}\left(\frac{U_H}{U_Б}\right)^2 \end{aligned}\right\}$$

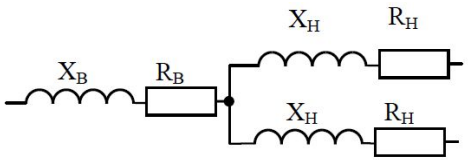
Если в справочнике (паспорте) приведены все значения $\Delta P_К$

$$R_{*B} = R_{*C} = \frac{\Delta P_k}{2S_H}\frac{S_Б}{S_H}\left(\frac{U_H}{U_Б}\right)^2;\ R_{*H} = R_{*B}\cdot\frac{S_H}{S_{HH}}$$

Если в справочнике (паспорте) приведено только одно значение $\Delta P_К$

Трансформатор с расщепленной обмоткой





Паспортные данные, использованные в формулах:

- номинальная мощность $S_Н$, МВА (перевести, если дано в кВА);
- номинальные напряжения обмоток (высшего и низшего напряжений) $U_{ВН}$, $U_{НН1}$, $U_{НН2}$, кВ;
- напряжения короткого замыкания между обмотками (попарно) $U_{КВ\text{-}Н}$, $U_{КН1\text{-}Н2}$, либо единое $U_К$, %;
- потери короткого замыкания $\Delta P_К$, МВт (перевести, если дано в кВт).

Определение индуктивных сопротивлений для полных исходных данных

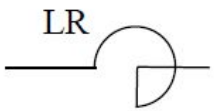
$$\left.\begin{aligned} X_{*В} &= 0{,}01\left(U_{kВ-Н} - 0{,}25U_{kН1-Н2}\right)\frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2 \\ X_{*Н1} &= X_{*Н2} = 0{,}005U_{kН1-Н2}\frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2 \end{aligned}\right\}$$

Если дано одно значение $U_К$ ($U_{КВ\text{-}Н}$), индуктивные сопротивления определяют приближенно

$$\left.\begin{aligned} X_{*В} &= 0{,}00125U_k\frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2 \\ X_{*Н1} &= X_{*Н2} = 0{,}0175U_k\frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2 \end{aligned}\right\}$$

$$R_{*В} = \frac{\Delta P_k}{2S_Н}\frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2, \quad R_{*Н1} = R_{*Н2} = \frac{\Delta P_k}{S_Н}\frac{S_Б}{S_Н}\left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2$$

Реактор



Паспортные данные, использованные в формулах:

- номинальное напряжение $U_Н$, кВ;
- номинальный ток $I_Н$, кА (перевести, если дано в А);
- номинальное индуктивное сопротивление $X_р$, Ом;
- потери мощности (на фазу) при номинальном токе ΔP, МВт (перевести, если дано в кВт).

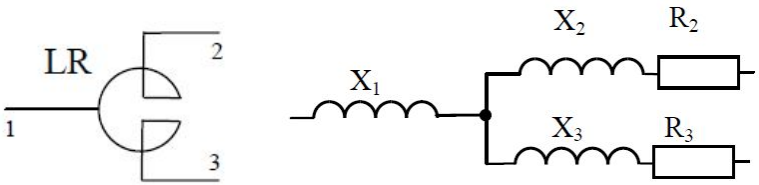
Индуктивное сопротивление реактора (о.е.):

$X_{*Р} = X_Р \frac{S_Б}{U_Б^2}$, если сопротивление дано в % - $X_{*Р} = \frac{X_{Р\%}}{100} \frac{S_Б}{\sqrt{3} U_Н I_Н} \left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2$

Активное сопротивление реактора (о.е.):

$$R_* = \frac{\Delta P}{I_Н^2} \frac{S_Б}{\sqrt{3} U_Н I_Н} \left(\frac{U_Н}{U_Б}\right)^2$$

Сдвоенный реактор



Паспортные данные, использованные в формулах:

- номинальное напряжение $U_Н$, кВ;
- номинальный ток $I_Н$, кА (перевести, если дано в А);
- номинальное индуктивное сопротивление $X_р$, Ом;
- номинальный коэффициент связи $K_{св}$;
- потери мощности (на фазу) при номинальном токе ΔP, МВт (перевести, если дано в кВт).

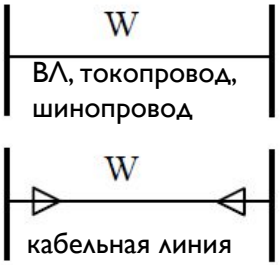
Индуктивные сопротивления реактора (о.е.):

$$X_1 = -K_{св} X_P \frac{S_Б}{\sqrt{3} I_Н U_Н} \left(\frac{U_Н}{U_Б} \right)^2, \quad X_2 = X_3 = (1 + K_{св}) X_p \frac{S_Б}{\sqrt{3} I_Н U_Н} \left(\frac{U_Н}{U_Б} \right)^2$$

Активные сопротивления реактора (о.е.):

$$R_2 = R_3 = \frac{\Delta P}{2 I_Н^2} \frac{S_Б}{\sqrt{3} I_Н U_Н} \left(\frac{U_Н}{U_Б} \right)^2.$$

Воздушные линии электропередачи, кабели, токопроводы и шинопроводы



Паспортные данные, использованные в формулах:

- номинальное напряжение U_H, кВ;
- длина линии l;
- удельное индуктивное сопротивление прямой последовательности X_1;
- удельное активное сопротивление (при рабочей температуре) R;

$$X_{*W} = X_{уд} l \frac{S_Б}{U_Б^2},\ R_{*W} = R_{уд} l \frac{S_Б}{U_Б^2}.$$

Размерность длины линии должна соответствовать размерности удельного сопротивления (Ом/км; Ом/м; мОм/м)