



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Переходные процессы в системах электроснабжения

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

Преподаватель: Никитин Дмитрий Сергеевич
к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ
248 ауд. 8 корп., вн. тел. 1978

Томск – 2022



Индивидуальное домашнее задание

Расчет режимов короткого замыкания в системах электроснабжения

Задание 1. Составление расчетной схемы замещения простейшей системы электроснабжения

Задание 2. Расчет режима трехфазного КЗ системы электроснабжения

Задание 3. Расчет несимметричного режима простейшей системы электроснабжения



Задание 1.1

Расчетная схема замещения простейшей системы электроснабжения

Для соответствующего варианта (выдается преподавателем) для простейшей СЭС и силового оборудования выполнить:

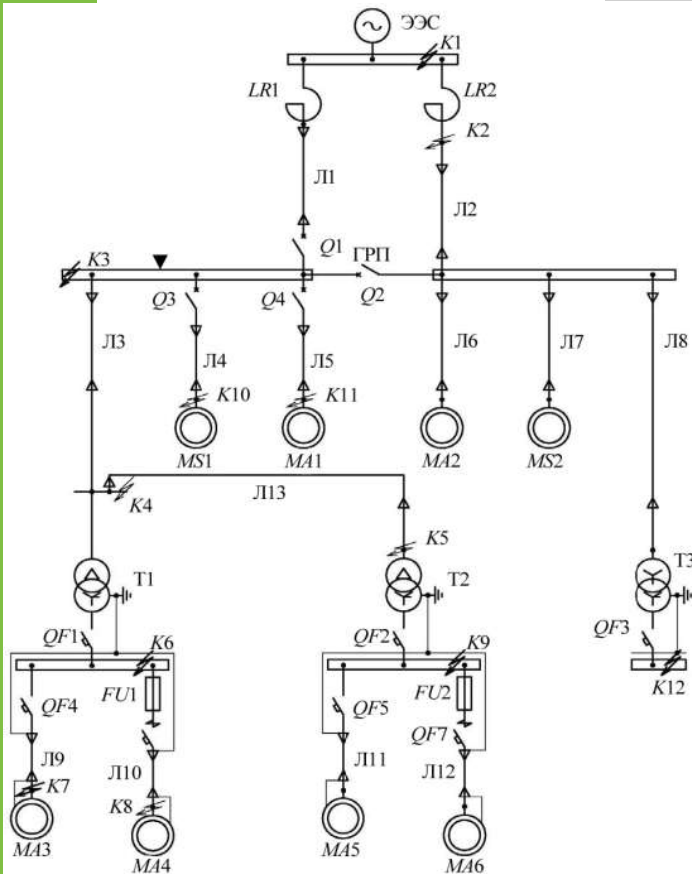
1. Сформировать исходные данные своего варианта

2. Пронумеровать и обозначить на принципиальной схеме ступени напряжения
3. Выбрать базисные напряжения ступеней и базисную мощность для приближенного метода расчета
4. Рассчитать параметры схемы замещения в системе относительных единиц (результаты представить в виде таблицы)
5. Рассчитать параметры схемы замещения в системе именованных единиц (результаты представить в виде таблицы)
6. Нарисовать схему замещения

Задание 1.1

Исходные данные

Q1, Q2– линейные выключатели;
 Q3, Q4– вводные выключатели;
 Q5 – секционный выключатель (в нормальном режиме отключен);
 QF1–QF4 – автоматические выключатели (расцепители) в электроустановках 0,4 кВ;
 K1–K12 – точки предполагаемых коротких замыканий.





Учет подпитки мест КЗ от крупных ЭД

Токи при КЗ на шинах ГРП или ГПП рассчитываются для наиболее тяжелых условий, когда схема находится в послеаварийном режиме вследствие отключения поврежденной линии Л1 вводным выключателем Q1. Секционный выключатель Q2 включен, благодаря чему обеспечивается бесперебойное электроснабжение потребителей первой секции шин. Во всех остальных случаях схема находится в нормальном состоянии: секционный выключатель Q1 отключен; первая секция шин ГРП или ГПП получает питание по Л1, вторая секция шин – по Л2.

Задание 1.1

Исходные данные

Трансформаторы Т1, Т2, Т3 марка ТМ-100

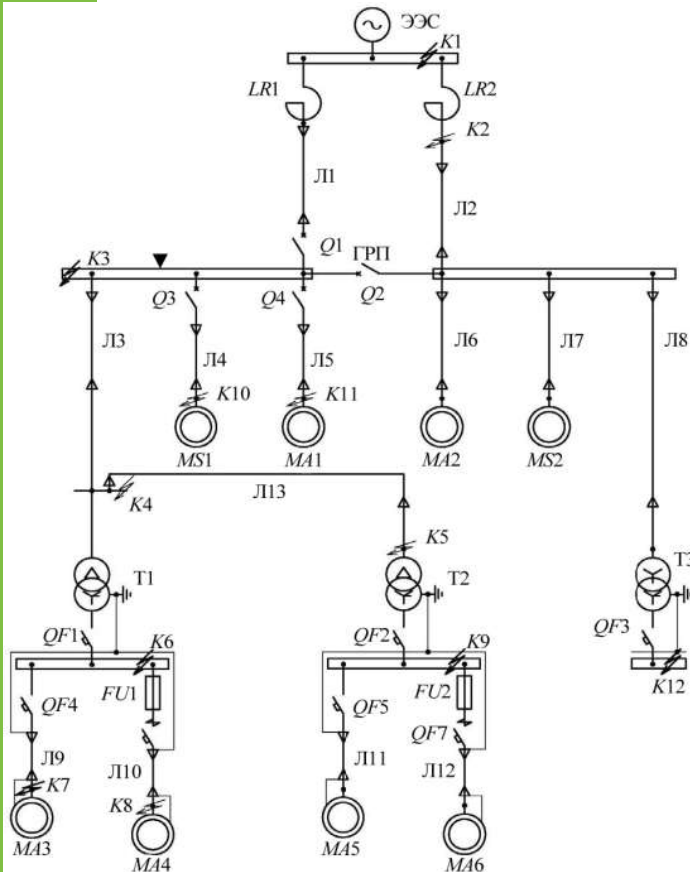
Кабельные линии Л8, Л13 $F=25 \text{ мм}^2$
(к трансформаторам Т2, Т3)

Синхронные двигатели MS1, MS2 – СТД-2000

Асинхронные двигатели МА1, МА2 – 2А3М-2500

Система – 10,5 кВ, 600 МВА

Реакторы LR1, LR2 – РБ 10-1000-0.14





Задание 1.2

Расчетная схема замещения простейшей системы электроснабжения

Для соответствующего варианта (выдается преподавателем) для простейшей СЭС и силового оборудования выполнить:

1. Сформировать исходные данные своего варианта

2. Пронумеровать и обозначить на принципиальной схеме ступени напряжения

3. Выбрать базисные напряжения ступеней и базисную мощность для приближенного метода расчета

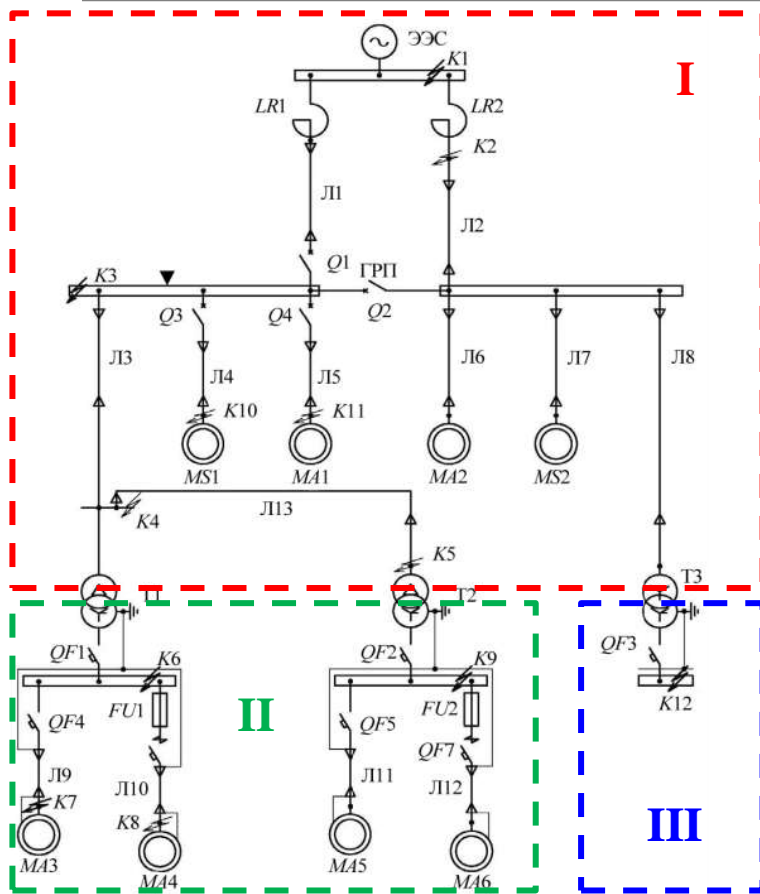
4. Рассчитать параметры схемы замещения в системе относительных единиц (результаты представить в виде таблицы)

5. Рассчитать параметры схемы замещения в системе именованных единиц (результаты представить в виде таблицы)

6. Нарисовать схему замещения



Задание 1.2





Задание 1.

Расчетная схема замещения простейшей системы электроснабжения

Для соответствующего варианта (выдается преподавателем) для простейшей СЭС и силового оборудования выполнить:

1. Сформировать исходные данные своего варианта
2. Пронумеровать и обозначить на принципиальной схеме ступени напряжения

3. Выбрать базисные напряжения ступеней и базисную мощность для приближенного метода расчета

4. Рассчитать параметры схемы замещения в системе относительных единиц (результаты представить в виде таблицы)
5. Рассчитать параметры схемы замещения в системе именованных единиц (результаты представить в виде таблицы)
6. Нарисовать схему замещения



Задание 1.

За **базовое напряжение** принимают среднее номинальное напряжение той ступени, где производится расчет токов КЗ. Среднее значение напряжения принимают на 5 % выше номинального напряжения сети. Шкала $U_{\text{ср.ном.}} = 230, 115, 37, 10,5, 6,3, 0,69, 0,4, 0,23$ кВ.

За **базовую мощность** для удобства подсчетов принимают 100, 1000 МВА или номинальную мощность самого большого трансформатора.



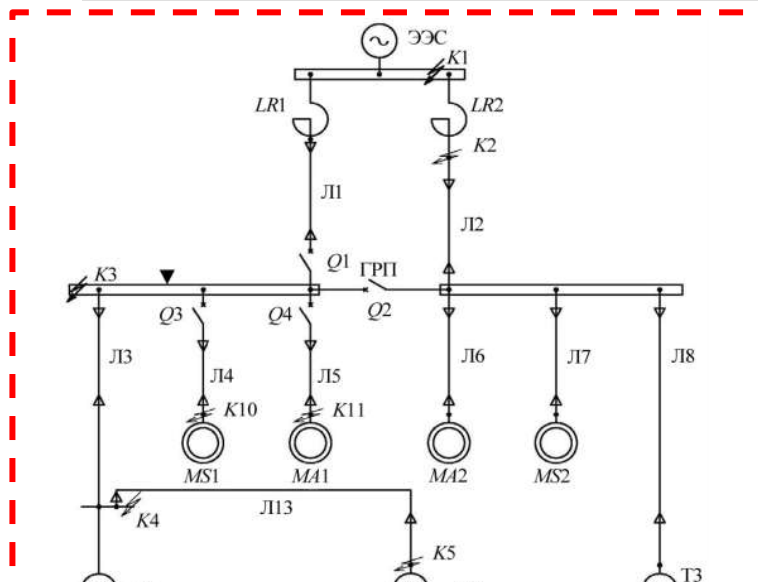
Задание 1.

За **базовое напряжение** принимают среднее номинальное напряжение той ступени, где производится расчет токов КЗ. Среднее значение напряжения принимают на 5 % выше номинального напряжения сети. Шкала $U_{\text{ср.ном.}}$ = 230, 115, 37, **10,5**, 6,3, **0,69**, **0,4**, 0,23 кВ.

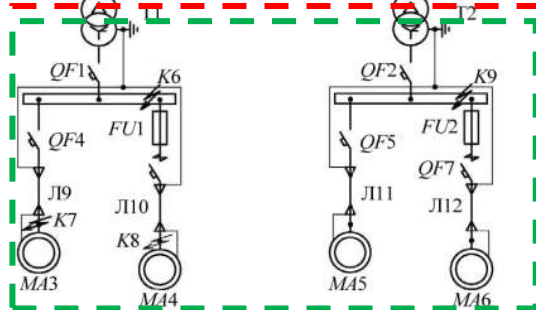
За **базовую мощность** для удобства подсчетов принимают 100, 1000 МВА или номинальную мощность самого большого трансформатора.

Задание 1.2

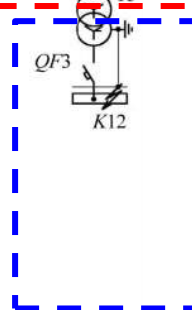
I – 10,5 кВ



II – 0,4 кВ



III – 0,69 кВ





Задание 1.

Расчетная схема замещения простейшей системы электроснабжения

Для соответствующего варианта (выдается преподавателем) для простейшей СЭС и силового оборудования выполнить:

1. Сформировать исходные данные своего варианта
2. Пронумеровать и обозначить на принципиальной схеме ступени напряжения
3. Выбрать базисные напряжения ступеней и базисную мощность для приближенного метода расчета
- 4. Рассчитать параметры схемы замещения в системе относительных единиц (результаты представить в виде таблицы)**
- 5. Рассчитать параметры схемы замещения в системе именованных единиц (результаты представить в виде таблицы)**
6. Нарисовать схему замещения



Задание 1.

Расчетная схема замещения простейшей системы электроснабжения

Для соответствующего варианта (выдается преподавателем) для простейшей СЭС и силового оборудования выполнить:

1. Сформировать исходные данные своего варианта
2. Пронумеровать и обозначить на принципиальной схеме ступени напряжения
3. Выбрать базисные напряжения ступеней и базисную мощность для приближенного метода расчета
4. Рассчитать параметры схемы замещения в системе относительных единиц (результаты представить в виде таблицы)
5. Рассчитать параметры схемы замещения в системе именованных единиц (результаты представить в виде таблицы)
- 6. Нарисовать схему замещения**



Составление расчетной схемы


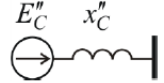
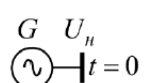
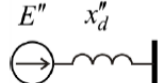
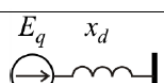
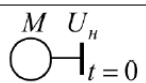
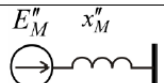
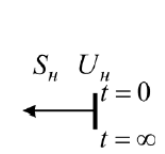
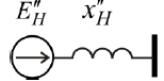
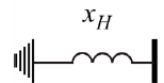
Для расчета токов КЗ составляется расчетная схема – упрощенная однолинейная схема электроустановки, в которой учитываются все источники питания (генераторы, синхронные компенсаторы, энергосистемы), трансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы. При составлении расчетной схемы исходят из условий длительной работы электроустановок рассчитываемой сети.

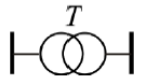
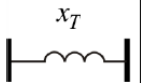
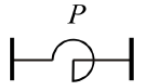
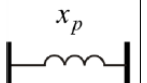
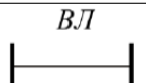
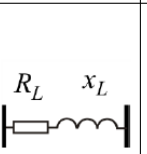
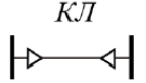
По расчетной схеме составляется схема замещения, в которой указываются сопротивления всех элементов и намечаются точки для расчета токов КЗ.

Генераторы, трансформаторы большой мощности, воздушные линии, реакторы обычно представляются в схеме замещения их индуктивными сопротивлениями, так как активные сопротивления во много раз меньше индуктивных.

Кабельные линии 6-10 кВ, трансформаторы мощностью до 1000 кВА в схеме замещения представляются индуктивными и активными сопротивлениями.

Исходные данные

Наименование элемента	Принципиальная схема	Схема замещения	Расчетные выражения сопротивлений в именованных единицах
Система			$x_C'' = \frac{U_{\text{ср.н}}^2}{S_{\text{кз}}}$
Синхронный генератор, синхронный двигатель			$x_d'' = x_{d^{*(н)}}'' \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$
			$x_d = x_{d^{*(н)}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$
Асинхронный двигатель			$x_{\text{Ад}}'' = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{I_{\text{п}} * S_{\text{НОМ}}}$
Обобщенная нагрузка			$x_H'' = 0,35 \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$
			$x_H = 1,2 \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$

Трансформатор			$x_T = \frac{u_{\text{к\%}} U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$
Реактор			$x_p = \frac{x_p \% U_{\text{НОМ}}}{100 \sqrt{3} I_{\text{НОМ}}}$
Воздушная или кабельная линия			$R_L = r_0 l$ $x_L = x_0 l$
			

Задание 1.

Исходные данные

Трансформаторы Т1, Т2, Т3 марка ТМ-100

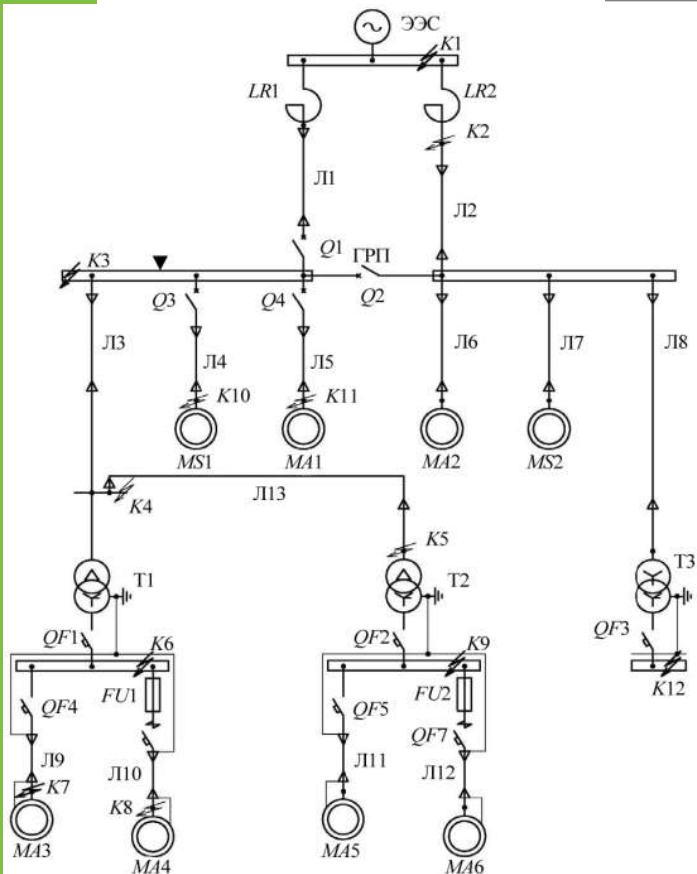
Кабельные линии Л8, Л13 $F=25 \text{ мм}^2$
(к трансформаторам Т2, Т3)

Синхронные двигатели MS1, MS2 – СТД-2000

Асинхронные двигатели МА1, МА2 – 2А3М-2500

Система – 10,5 кВ, 600 МВА

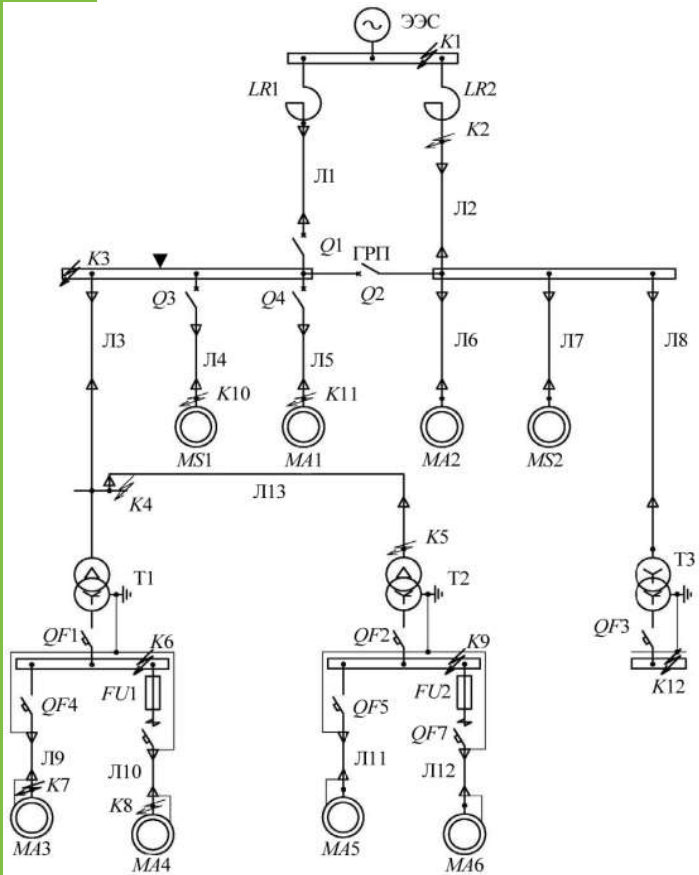
Реакторы LR1, LR2 – РБ 10-1000-0.14



Задание 1.

Исходные данные

$$U_{осн} = 10.5 \quad U_{62} = 0.4 \quad S_6 = 100 \quad U_{63} = 0.69$$





Энергосистема

Исходные данные


Система – 10,5 кВ, 600 МВА

$$E_c = 10.5 \text{ кВ} \quad S_{к.з} = 600 \text{ МВА}$$

Электрическая система с достаточной для практических расчетов точностью моделируется источником ЭДС за индуктивным сопротивлением (активным сопротивлением системы обычно пренебрегают, ввиду его малости).

Величина ЭДС принимается равным среднему номинальному напряжению сети $U_{\text{ср.ном}}$, кВ. Индуктивное сопротивление системы находится по значению мощности КЗ на выводах обмотки высшего напряжения питающего трансформатора

Энергосистема

<p>1.</p> 	<p>Параметры электроэнергетической системы (ЭЭС)</p> <p>E_c – ЭДС электроэнергетической системы в узле подключения к СЭС предприятия, кВ;</p> <p>$S_k^{(3)}$ – мощность системы при трехфазном КЗ в узле подключения, МВА</p> <p>U_{δ} – базисное напряжение на ступени системы, кВ.</p>
---	---

1. Расчетные параметры в именованных единицах

$$x_c = \frac{E_c^2}{S_k^{(3)}} \cdot \left(\frac{U_{осн}}{U_{\delta}} \right)^2 \text{ – реактивное сопротивление системы Ом;}$$

$$E_c = E_c \cdot \frac{U_{осн}}{U_{\delta}} \text{ – ЭДС системы, кВ.}$$

2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах

$$x_{*c(\delta)} = \frac{E_c^2}{S_k^{(3)}} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} \text{ – реактивное сопротивление системы, от. ед.};$$

$$E_{*c(\delta)} = E_c / U_{\delta} \text{ – ЭДС системы, от. ед.};$$



Энергосистема

Исходные данные

Система – 10,5 кВ, 600 МВА

$$1) X_c = \frac{E_c^2}{S_{к.3}} \cdot \left(\frac{U_{оcн}}{U_{оcн}} \right)^2 = \frac{10.5^2}{600} \cdot \left(\frac{10.5}{10.5} \right)^2$$

$$X_c = 0.184$$

$$E_c = E_c \cdot \frac{U_{оcн}}{U_{оcн}} = 10.5$$

$$2) X_{2c} = \frac{E_c^2}{S_{к.3}} \cdot \left(\frac{S_{\delta}}{U_{оcн}^2} \right) = 0.167$$

$$E_{2c} = \frac{E_c}{U_{оcн}} = 1$$



Энергосистема

При отсутствии данных о величине $S_{\text{кз сист.}}$ значение $x_{\text{сист}}$ может быть определено по номинальному току отключения выключателя $I_{\text{ном откл}}$, установленного в питающей сети напряжением выше 1000 В:

$$x_{\text{сист}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном откл}}}$$

Электроустановки объектов электроснабжения напряжением до 1000 В обычно запитываются от понижающих трансформаторов с номинальной мощностью $S_{\text{ном тр.}} = 25 \dots 2500$ кВА. Если мощность КЗ на стороне высшего напряжения трансформатора $S_{\text{кз сист.}} \geq 25 \cdot S_{\text{ном тр.}}$, то периодическая составляющая тока КЗ будет неизменной. В большинстве случаев для цеховых сетей это соотношение выполняется. Тогда можно считать, что КЗ в сетях до 1000 В питается от системы с неограниченной мощностью, т.е. $x_{\text{сист.}} = 0$.



Трансформатор

Исходные данные

Трансформаторы Т1, Т2, Т3 марка ТМ-100

$$S_{H.T1.2} = 0.4 \text{ МВА} \quad U_{BH.T1.2} = 10.5 \text{ кВ} \quad U_{HH.T1.2} = 0.4 \text{ кВ} \quad U_{K.T1.2} = 4.5 \%$$

$$\Delta P_{K.T1.2} = 0.0059 \text{ МВт} \quad R_{0.T1.2} = 55.6 \text{ мОм} \quad X_{0.T1.2} = 149 \text{ мОм}$$

$$S_{H.T3} = 0.4 \text{ МВА} \quad U_{BH.T3} = 10.5 \text{ кВ} \quad U_{HH.T3} = 0.6 \text{ кВ} \quad U_{K.T3} = 4.5 \%$$

$$\Delta P_{K.T3} = 0.0059 \text{ МВт} \quad R_{0.T3} = 55.6 \text{ мОм} \quad X_{0.T3} = 149 \text{ мОм}$$

При моделировании схемы замещения силовых трансформаторов для расчета токов КЗ пренебрегают поперечными составляющими, которые в данной постановке задачи не актуальны.



Трансформатор



Параметры двухобмоточного трансформатора

$S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность, МВА;

$U_{\text{ВН}} / U_{\text{НН}}$ – соответственно номинальное напряжение обмоток высокого и низкого напряжения трансформатора, кВ;

u_k – напряжение короткого замыкания, %;

ΔP_k – потери короткого замыкания, МВт.

Для трансформаторов с $U_{\text{ВН}} = 110$ кВ и выше активное сопротивление по сравнению с реактивным мало, поэтому им можно пренебречь. Тогда реактивное сопротивление приравнивают к полному, т.е. $x_T \approx Z_T$, (Ом).

1. Расчетные параметры в именованных единицах

$$Z_T = \frac{u_k U_{\text{осн}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}} \text{ – полное сопротивление трансформатора, Ом;}$$

$$R_T = \frac{\Delta P_k U_{\text{осн}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} \text{ – активное сопротивление трансформатора, Ом;}$$

$$x_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \text{ – реактивное сопротивление трансформатора Ом.}$$

2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах

$$Z_{*T(\delta)} = \frac{u_k S_{\delta}}{100 S_{\text{НОМ}}} \text{ – полное сопротивление трансформатора, от. ед.;}$$

$$R_{*T(\delta)} = \frac{\Delta P_k S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}^2} \text{ – активное сопротивление трансформатора, от. ед.;}$$

$$x_{*T(\delta)} = \sqrt{Z_{*T(\delta)}^2 - R_{*T(\delta)}^2} \text{ – реактивное сопротивление трансформатора, от. ед.,}$$



Трансформатор

Исходные данные

Трансформаторы Т1, Т2, Т3 марка ТМ-100

$$1) \quad Z_{Т12} = \frac{U_{к.Т1.2} \cdot U_{очн}^2}{100 \cdot S_{н.Т1.2}} = 12.403$$

$$R_{Т12} = \frac{\Delta P_{к.Т1.2} \cdot U_{очн}^2}{S_{н.Т1.2}^2} = 4.065$$

$$X_{Т12} = \sqrt{Z_{Т12}^2 - R_{Т12}^2} = 11.718$$

$$2) \quad Z_{2Т12} = \frac{U_{к.Т1.2} \cdot S_{\sigma}}{100 \cdot S_{н.Т1.2}} = 11.25$$

$$R_{2Т12} = \frac{\Delta P_{к.Т1.2} \cdot S_{\sigma}}{S_{н.Т1.2}^2} = 3.687$$

$$X_{2Т12} = \sqrt{Z_{2Т12}^2 - R_{2Т12}^2} = 10.628$$



Трансформатор

Исходные данные

Трансформаторы Т1, Т2, Т3 марка ТМ-100

$$Z_{Т3} = \frac{U_{к.Т3} \cdot U_{осн}^2}{100 \cdot S_{н.Т3}} = 12.403$$

$$R_{Т3} = \frac{\Delta P_{к.Т3} \cdot U_{осн}^2}{S_{н.Т3}^2} = 4.065$$

$$X_{Т3} = \sqrt{Z_{Т3}^2 - R_{Т3}^2} = 11.718$$

$$Z_{2Т3} = \frac{U_{к.Т3} \cdot S_{\sigma}}{100 \cdot S_{н.Т3}} = 11.25$$

$$R_{2Т3} = \frac{\Delta P_{к.Т3} \cdot S_{\sigma}}{S_{н.Т3}^2} = 3.687$$

$$X_{2Т3} = \sqrt{Z_{2Т3}^2 - R_{2Т3}^2} = 10.628$$

ЛЭП

Исходные данные

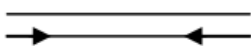
Кабельные линии Л8, Л13 $F=25 \text{ мм}^2$
(к трансформаторам Т2, Т3)

$$U_{\text{Л8.13}} = 10 \quad \text{кВ} \quad R_{\text{П8.13}} = 1.940 \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \quad X_{\text{П8.13}} = 0.113 \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \quad l_{\text{Л8.13}} = 0.2 \quad \text{км}$$



ЛЭП

3.



Параметры воздушной (ВЛ) и кабельной (КЛ) линии

$r_{\text{ПГ}}$, $x_{\text{ПГ}}$ – погонные активное и индуктивное сопротивления одной цепи линии, Ом/км;

L – протяженность (ВЛ) или (КЛ) линии, км;

n – число параллельных линий;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение линии, кВ.

$U_{\text{б}}$ – базисное напряжение ступени, на которой находится линия, кВ.

1. Расчетные параметры в именованных единицах на ступени ВЛ, КЛ

$$r_{\text{Л}} = r_{\text{ПГ}} \frac{L}{n} \cdot \left(\frac{U_{\text{осн}}}{U_{\text{б}}} \right)^2; x_{\text{Л}} = x_{\text{ПГ}} \frac{L}{n} \cdot \left(\frac{U_{\text{осн}}}{U_{\text{б}}} \right)^2; \text{ – эквивалентное активное и}$$

индуктивное сопротивления n параллельных линий (Ом).

2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах

$$r_{*\text{Л(б)}} = r_{\text{ПГ}} \frac{L}{n} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2}; x_{*\text{Л(б)}} = x_{\text{ПГ}} \frac{L}{n} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2}; \text{ – эквивалентное активное и индуктивное}$$

сопротивления n параллельных линий, (от. ед.),



Исходные данные

Кабельные линии Л8, Л13 F=25 мм²
(к трансформаторам Т2, Т3)

$$1) \quad r_{Л} = R_{П8.13} \cdot \frac{l_{Л8.13}}{n} \cdot \left(\frac{U_{ОСН}}{U_{ОСН}} \right)^2 = 0.388$$

$$x_{Л} = X_{П8.13} \cdot \left[\frac{l_{Л8.13}}{n} \cdot \left(\frac{U_{ОСН}}{U_{ОСН}} \right)^2 \right] = 0.023$$

$$2) \quad r_{2Л} = R_{П8.13} \cdot \frac{l_{Л8.13}}{n} \cdot \left(\frac{S_{\sigma}}{U_{ОСН}^2} \right) = 0.352$$

$$x_{2Л} = X_{П8.13} \cdot \left[\frac{l_{Л8.13}}{n} \cdot \left(\frac{S_{\sigma}}{U_{ОСН}^2} \right) \right] = 0.02$$



Синхронный двигатель

Исходные данные

Синхронные двигатели MS1, MS2 – СТД-2000

$$P_{\text{сд}} = 0.8 \text{ МВт} \quad U_{\text{н.сд}} = 10 \text{ кВ} \quad I_{\text{н.сд}} = 0.054 \text{ кА} \quad \cos\phi_{\text{н.сд}} = 0.9$$
$$I_{\text{п.сд}} = 6.7 \quad \eta_{\text{сд}} = 0.96 \quad M_{\text{п.сд}} = 2.01$$



Синхронный двигатель

4.



Параметры синхронного двигателя (MS)

$P_{\text{НОМ}}$ – номинальная активная мощность, МВт;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение, кВ;

$I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток, А;

$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности, от. ед.;

$\eta_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент полезного действия, от. ед.;

$I_{*\text{ПСК}}$ – кратность пускового тока, от. ед.;

$M_{*\text{ПСК}}$ – кратность начального пускового момента, от. ед.

$U_{\text{б}}$ – базисное напряжение ступени, на которой находится двигатель, кВ.

Расчетные параметры СД, приведенные к номинальным (рассчитывают всегда)

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}}} \text{ – полная номинальная мощность, МВА;}$$

$$R_{*\text{СД(НОМ)}} = \left[0,25(1 - \eta_{\text{НОМ}}) \cos\varphi_{\text{НОМ}} \right] \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right) \text{ – активное сопротивление}$$

статорной обмотки, от. ед.

$$X_{*\text{СД(НОМ)}}'' = \left\{ \frac{1}{I_{*\text{ПСК}}} \sqrt{1 - \left(\frac{M_{*\text{ПСК}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}}}{I_{*\text{ПСК}}} \right)^2} \right\} \text{ – сверхпереходная реактив-}$$

ность двигателя, от. ед.

Допустимо использовать упрощенную формулу расчета сверхпереходной реактивности для синхронных двигателей напряжением 6 (10) кВ

$X_{*\text{СД(НОМ)}}'' = 1 / I_{*\text{ПСК}}$ – сверхпереходная реактивность двигателя, от. ед.;

$$E_{*\text{СД(НОМ)}}'' = \sqrt{(\cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (\sin\varphi_{\text{НОМ}} + X_{*\text{СД(НОМ)}}'')^2} \text{ – сверхпереходная ЭДС двигателя, от. ед.}$$

1. Расчетные параметры в именованных единицах на ступени напряжения СД

$$R_{\text{СД}} = R_{*\text{СД(НОМ)}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ОСН}}}{U_{\text{б}}} \right)^2 \text{ – активное сопротивление статорной обмотки, Ом;}$$

$$X_{\text{СД}}'' = X_{*\text{СД(НОМ)}}'' \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right) \cdot \left(\frac{U_{\text{ОСН}}}{U_{\text{б}}} \right)^2 \text{ – сверхпереходная реактивность дви-}$$

гателя, Ом

$$E_{\text{СД}}'' = (E_{*\text{СД(НОМ)}}'' \cdot U_{\text{НОМ}}) \cdot \frac{U_{\text{ОСН}}}{U_{\text{б}}} \text{ – сверхпереходная ЭДС двигателя, кВ.}$$

2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах

$$R_{*\text{СД(б)}} = R_{*\text{СД(НОМ)}} \cdot \left(\frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} \right) \text{ – активное сопротивление статорной обмотки, от. ед.}$$

$$X_{*\text{СД(б)}}'' = X_{*\text{СД(НОМ)}}'' \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right) \cdot \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} \right) \text{ – сверхпереходная реактивность дви-}$$

теля, от. ед.;

$$E_{*\text{СД(б)}}'' = E_{*\text{СД(НОМ)}}'' \cdot U_{\text{НОМ}} / U_{\text{б}} \text{ – сверхпереходная ЭДС двигателя, от. ед.}$$



Синхронный двигатель

Исходные данные

Синхронные двигатели MS1, MS2 – СТД-2000

Параметры синхронного двигателя

$$\sin\phi_{\text{н.сд}} = \sqrt{1 - \cos\phi_{\text{н.сд}}^2} = 0.436$$

1)

$$S_{\text{НОМ1}} = \frac{P_{\text{сд}}}{\eta_{\text{сд}} \cdot \cos\phi_{\text{н.сд}}} = 0.926$$

$$R'_{\text{СДНОМ}} = [0.25 \cdot (1 - \eta_{\text{сд}}) \cdot \cos\phi_{\text{н.сд}}] \cdot \left(\frac{U_{\text{н.сд}}^2}{S_{\text{НОМ1}}} \right) = 0.972$$

$$R_{\text{СД}} = R'_{\text{СДНОМ}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ОСН}}}{U_{\text{н.сд}}} \right)^2 = 0.972$$

$$X''_{\text{СДНОМ}} = \frac{1}{I_{\text{п.сд}}} = 0.149$$

$$X''_{\text{СД}} = X''_{\text{СДНОМ}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ОСН}}}{U_{\text{н.сд}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_{\text{н.сд}}^2}{S_{\text{НОМ1}}} \right) = 16.119$$



Синхронный двигатель

Исходные данные

Синхронные двигатели MS1, MS2 – СТД-2000

$$E''_{\text{СДном}} = \sqrt{\cos\phi_{\text{н.сд}}^2 + (\sin\phi_{\text{н.сд}} + X''_{\text{СДном}})^2} = 1.073$$

$$E''_{\text{СД}} = E''_{\text{СДном}} \cdot U_{\text{н.сд}} \cdot \frac{U_{\text{осн}}}{U_{\text{осн}}} = 10.735$$

2)

$$R_{\text{СДб}} = R_{\text{СДном}} \cdot \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{осн}}^2} \right) = 0.882$$

$$X''_{\text{СДб}} = X''_{\text{СДном}} \cdot \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{осн}}^2} \right) = 0.135$$

$$E''_{\text{СДб}} = \frac{E''_{\text{СДном}}}{U_{\text{осн}}} = 0.102$$



Асинхронный двигатель

Исходные данные

Асинхронные двигатели МА1, МА2 – 2А3М-2500

$$P_{\text{ад}1.2} = 2.5 \quad \text{МВт} \quad U_{\text{н.ад}1.2} = 10 \quad \text{кВ} \quad I_{\text{н.ад}1.2} = 0.162 \quad \text{кА} \quad \cos\phi_{\text{н.ад}1.2} = 0.92$$

$$\eta_{\text{ад}1.2} = 0.969 \quad I_{\text{п.ад}1.2} = 5.3 \quad s_{\text{ад}1.2} = 0.00833 \quad M_{\text{м.ад}1.2} = 2.3$$

Асинхронный двигатель

5.



Параметры асинхронного двигателя (МА)

$P_{\text{ном}}$ – номинальная активная мощность, МВт;
 $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ;
 $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток, А;
 $\cos\varphi_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент мощности, от. ед.;
 $\eta_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент полезного действия, от. ед.;
 $s_{\text{ном}}$ – номинальное скольжение, от. ед.;
 $I_{*\text{пск}}$ – кратность пускового тока, от. ед.;
 $M_{*\text{max}}$ – кратность максимального вращающего момента, от. ед.;
 $R_{*\text{АД(ном)}}$ – активное сопротивление статорной обмотки для АД напряжением 0,38; 0,66 кВ, от. ед.
 U_6 – базисное напряжение ступени, на которой находится асинхронный двигатель, кВ.

Расчетные параметры АД, приведенные к номинальным (расчитывают всегда)

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}} - \text{полная номинальная мощность, МВА};$$

Для асинхронного двигателя напряжением 6, 10 кВ:

$$R_{*\text{АД(ном)}} = \frac{s_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} \left(\frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} \right) - \text{активное сопротивление статорной, от. ед.};$$

Для асинхронных двигателей напряжением 0,38; 0,66 кВ:

$$R_{*\text{АД(ном)}} = R_{*\text{АД(ном)}} \left(\frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} \right) - \text{активное сопротивление статорной обмотки}$$

где $R_{*\text{АД(ном)}}$ – активное сопротивление статорной обмотки паспортное значение;

$$X_{*\text{АД(ном)}}'' = \frac{0,475}{M_{*\text{max}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}} - \text{сверхпереходная реактивность двигателя,}$$

от. ед.

Допустимо использовать упрощенную формулу расчета сверхпереходной реактивности для асинхронных двигателей напряжением 6 (10) кВ:

$$X_{*\text{АД(ном)}}'' = 1 / I_{*\text{пск}} - \text{сверхпереходная реактивность двигателя, от. ед.};$$

$$E_{*\text{АД(ном)}}'' = \sqrt{(\cos\varphi_{\text{ном}})^2 + (\sin\varphi_{\text{ном}} - X_{*\text{АД(ном)}}'')^2} - \text{сверхпереходная ЭДС двигателя, от. ед.};$$

Асинхронный двигатель

1. Расчетные параметры АД в именованных единицах

$$R_{\text{АД}} = R_{*\text{АД}(\text{НОМ})} \cdot \left(\frac{U_{\text{ОСН}}}{U_{\text{б}}} \right)^2 - \text{активное сопротивление статорной обмотки,}$$

Ом.

$$X''_{\text{АД}} = X''_{*\text{АД}(\text{НОМ})} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right) \left(\frac{U_{\text{ОСН}}}{U_{\text{б}}} \right)^2 - \text{сверхпереходная реактивность двига-}$$

теля, Ом;

$$E''_{\text{АД}} = (E''_{*\text{АД}(\text{НОМ})}) \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \frac{U_{\text{ОСН}}}{U_{\text{б}}} - \text{сверхпереходная ЭДС двигателя, кВ.}$$

2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах

$$R_{*\text{АД}(\text{б})} = R_{*\text{АД}(\text{НОМ})} \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} \right) - \text{активное сопротивление статорной обмотки асин-}$$

хронного двигателя, от. ед.

$$X''_{*\text{АД}(\text{б})} = X''_{*\text{АД}(\text{НОМ})} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right) \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} \right) - \text{сверхпереходная реактивность асин-}$$

хронного двигателя, от. ед.;

$$E''_{*\text{АД}(\text{б})} = E''_{*\text{АД}(\text{НОМ})} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{б}}} \right) - \text{сверхпереходная ЭДС асинхронного двига-}$$

теля, от. ед.,



Асинхронный двигатель

Исходные данные

Асинхронные двигатели МА1, МА2 – 2АЗМ-2500

Параметры асинхронного двигателя

$$\sin\phi_{\text{н.ад1.2}} = \sqrt{1 - \cos\phi_{\text{н.ад1.2}}^2} = 0.392$$

$$1) \quad S_{\text{НОМ2}} = \frac{P_{\text{ад1.2}}}{\eta_{\text{ад1.2}} \cdot \cos\phi_{\text{н.ад1.2}}} = 2.804$$

$$R'_{\text{АДНОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ2}}}{\eta_{\text{ад1.2}}} = 2.894$$

$$R_{\text{АД}} = R'_{\text{АДНОМ}} \cdot \frac{(U_{\text{н.ад1.2}})^2}{S_{\text{НОМ2}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ОСН}}}{U_{\text{ОСН}}} \right)^2 = 103.199$$

$$X''_{\text{АДНОМ}} = \frac{1}{I_{\text{п.ад1.2}}} = 0.189$$

$$X''_{\text{АД}} = \frac{U_{\text{н.ад1.2}}^2}{I_{\text{п.ад1.2}} \cdot S_{\text{НОМ2}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ОСН}}}{U_{\text{ОСН}}} \right)^2 = 6.728$$



Асинхронный двигатель

Исходные данные

Асинхронные двигатели МА1, МА2 – 2А3М-2500

$$E'_{\text{АДНОМ}} = \sqrt{\cos\phi_{\text{н.ад1.2}}^2 + (\sin\phi_{\text{н.ад1.2}} - X''_{\text{АДНОМ}})^2} = 0.942$$

$$E''_{\text{АД}} = E'_{\text{АДНОМ}} \cdot U_{\text{н.ад1.2}} \cdot \frac{U_{\text{осн}}}{U_{\text{осн}}} = 9.422$$

2)

$$R_{\text{АДб}} = R'_{\text{АДНОМ}} \cdot \frac{(U_{\text{н.ад1.2}})^2}{S_{\text{НОМ2}}} \cdot \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{осн}}^2} \right) = 93.605$$

$$X''_{\text{АДб}} = X''_{\text{АДНОМ}} \cdot \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{осн}}^2} \right) = 0.171$$

$$E''_{\text{АДб}} = \left[\sqrt{\cos\phi_{\text{н.ад1.2}}^2 + (\sin\phi_{\text{н.ад1.2}} - X''_{\text{АДНОМ}})^2} \right] \cdot \left(\frac{U_{\text{осн}}}{U_{\text{осн}}} \right) = 0.942$$



Токоограничивающий реактор

Исходные данные

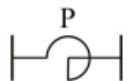
Реакторы LR1, LR2 – РБ 10-1000-0.14

$$U_{н.р} = 10 \text{ кВ} \quad x_{н.р} = 0.22 \text{ Ом} \quad \Delta P_p = 4.4 \text{ кВт} \quad I_p = 1000 \text{ А}$$



Токоограничивающий реактор

6.



Параметры токоограничивающего реактора

$U_{р.ном}$ – номинальное напряжение, кВ;

$I_{р.ном}$ – номинальный ток, А;

$X_{р.ном}$ – номинальное реактивное сопротивление, Ом;

$\Delta P_{р.}$ – номинальные потери активной мощности на фазу, кВт.

$U_{б}$ – базисное напряжение ступени, на которой находится реактор, кВ.

1. Расчетные параметры в именованных единицах на ступени напряжения реактора

$$R_p = \frac{\Delta P_p \cdot 10^{-3}}{I_{р.ном}^2} \cdot \left(\frac{U_{осн}}{U_{б}} \right)^2 \quad \text{– активное сопротивление реактора, Ом;}$$

$$X_p = X_{р.ном} \cdot \left(\frac{U_{осн}}{U_{б}} \right)^2 \quad \text{– реактивное сопротивление, Ом}$$

2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах

$$R_{*р(б)} = \frac{\Delta P_p \cdot 10^{-3}}{I_{р.ном}^2} \cdot \left(\frac{S_{б}}{U_{б}^2} \right) \quad \text{– активное сопротивление реактора, от. ед.};$$

$$X_{*р(б)} = X_{р.ном} \cdot \left(\frac{S_{б}}{U_{б}^2} \right) \quad \text{– реактивное сопротивление, от. ед.,}$$



Токоограничивающий реактор

Исходные данные

Реакторы LR1, LR2 – РБ 10-1000-0.14

$$1) \quad R_p = \frac{\Delta P_p \cdot 10^{-3}}{I_p^2} \cdot \left(\frac{U_{\text{осн}}}{U_{\text{осн}}} \right)^2 = 4.4 \times 10^{-9}$$

$$X_p = x_{\text{н.р}} \cdot \left(\frac{U_{\text{осн}}}{U_{\text{осн}}} \right)^2 = 0.22$$

$$2) \quad R_{\text{рб}} = \frac{\Delta P_p \cdot 10^{-3}}{I_p^2} \cdot \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{осн}}^2} \right) = 3.991 \times 10^{-9}$$

$$X_{\text{рб}} = x_{\text{н.р}} \cdot \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{осн}}^2} \right) = 0.2$$



Сопротивление неподвижных контактных соединений и переходные сопротивления подвижных контактов коммутационных аппаратов в электроустановках до 1000 В учесть приближенно, принимая для автоматических выключателей (QF) активное сопротивление, равное $R_F = 10-15 \text{ мОм}$.

Сопротивления токопровода (шин) от трансформатора к автоматическому выключателю ориентировочно принимаются равными $R_{ш} = 0,5 \text{ мОм}$, а $X_{ш} = 2,25 \text{ мОм}$. Значения переходного сопротивления контактов для различных ступеней электроснабжения даны в таблице 1.4, а неподвижных контактных соединений – в таблице 1.8.



Учет подпитки мест КЗ от крупных ЭД

При моделировании системы электроснабжения для расчета токов КЗ необходимо учитывать возможность подпитки места КЗ от электродвигателей большой мощности. За счет запаса кинетической энергии во вращающихся массах ротора и при значительном снижении напряжения питания (если двигатель непосредственно присоединен к месту КЗ напряжение на его зажимах во время аварии равно 0) электрическая машина переходит в генераторный режим и становится источником питания электрической цепи.

Учет подпитки мест короткого замыкания от электродвигателей производится, если они непосредственно связаны с точкой КЗ электрически и находятся в зоне малой удаленности (соединены только линией).



Расчет токов КЗ

На стадии проектирования любой системы электроснабжения необходимо определить **максимально возможные** (в начале каждого участка) и **минимально возможные** (в конце участка) токи КЗ.

По максимальным токам производится проверка сечений проводников, коммутационных и защитных аппаратов на термическую и динамическую стойкость к токам КЗ; расчет минимальных токов необходим для правильного выбора уставок аппаратов защиты.