



# Переходные процессы в системах электроснабжения

## ЛЕКЦИЯ № 3

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



## Исходные данные при расчете токов КЗ

---

На первом этапе расчета режима КЗ на основе принципиальной схемы СЭС составляется расчетная схема, соответствующая аварийному режиму. На ней в однолинейном изображении показываются источники питания, точки КЗ и все силовые элементы, по которым возможно протекание тока КЗ или его составляющих.

Для расчета токов КЗ необходимы параметры элементов электрической сети: ЛЭП, трансформаторов, автотрансформаторов, токоограничивающих реакторов, а также параметры источников тока КЗ: синхронных генераторов, асинхронных/синхронных двигателей.

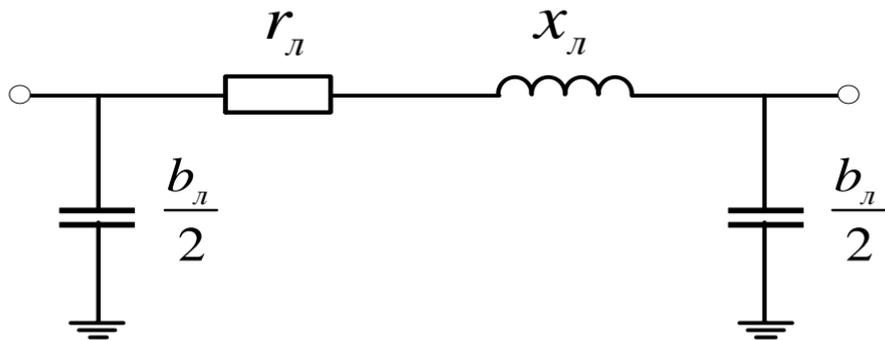


## 1. Воздушные и кабельные линии электропередачи

---

Элемент схемы замещения	Параметр	
ЛЭП, КЛЭП	$l$	Длина, км
	$r$	Удельное активное сопротивление, Ом/км
	$x_0$	Удельное индуктивное сопротивление прямой последовательности, Ом/км
	$x_{\text{нул посл}}$	Удельное индуктивное сопротивление нулевой последовательности, Ом/км
	$b$	Удельная емкостная проводимость, См/км
	$x_{\text{т нул посл}}$	Удельное индуктивное сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности от других линий, Ом/км

## 1. Воздушные и кабельные линии электропередачи



$$b_l = b_0 l$$

– емкостная  
проводимость.

$$r_l = r_0 l, \quad x_l = x_0 l$$

-- активное и реактивное  
сопротивления;

Емкостная проводимость учитывается только при расчете однофазного КЗ ( $K^{(1)}$ ) в сетях с изолированной нейтралью ( $U = 3; 6; 10; 35$  кВ).



## 1. Воздушные и кабельные линии электропередачи

---

$l$  – длина линии

$b_0$  – погонная емкостная проводимость линии

$r_0$  – погонное активное сопротивление линии

$x_0$  – погонное реактивное сопротивление линии



## 1. Воздушные и кабельные линии электропередачи

---

Принимая во внимание основные допущения, **воздушная (ВЛ) или кабельная (КЛ) линия электропередачи при расчетах коротких замыканий может быть представлена только индуктивным сопротивлением, за исключением расчета токов КЗ в сетях, выполненных проводами низкого сечения и в сетях до 1000 В. В этих случаях схема замещения ВЛ содержит активное и индуктивное сопротивления.**

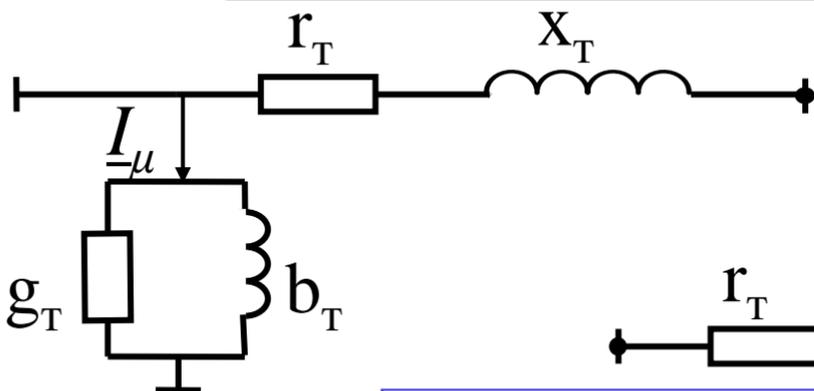
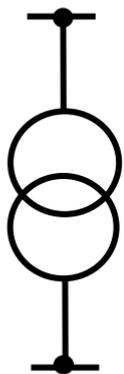
Конкретные значения погонных сопротивлений даются в справочниках в зависимости от марки провода и усредненного значения среднего геометрического расстояния между проводами.

Если отсутствуют данные о сечениях проводов, допустимо погонное индуктивное сопротивление ВЛ напряжением до 220 кВ принимать равным 0,4 Ом/км, линий напряжением 330 кВ – равным 0,325 Ом/км и линий напряжением 500 кВ – равным 0,307 Ом/км.

## 2. Трансформаторы и автотрансформаторы

Элемент схемы замещения	Параметр	
Трансформато- ры, автотранс- форматоры	$S_{\text{НОМ}}$	Номинальная мощность, МВА
	$u_{\text{КВ-Н}},$ $u_{\text{КВ-С}},$ $u_{\text{КС-Н}}$	Напряжения КЗ между обмотками, кВ
	$\Delta P_{\text{КВ-Н}},$ $\Delta P_{\text{КВ-С}},$ $\Delta P_{\text{КС-Н}}$	Потери КЗ, МВт
	$K_t$	Коэффициент трансформации

## 2. Трансформаторы и автотрансформаторы



а) полная схема  
замещения



б) упрощенная схема замещения,  
используемая при расчетах КЗ

Активное сопротивление учитывается для трансформаторов напряжением 0,4; 3; 6; 10; 35 кВ;

при  $U \geq 110$  кВ сопротивлением  $r_T$  можно пренебречь



## 2. Трансформаторы и автотрансформаторы

### Сопротивления трансформатора (Ом)

$$Z_T = \frac{u_k U_{\text{НН}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$$

полное сопротивление

$$R_T = \frac{\Delta P_k U_{\text{НН}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}$$

активное сопротивление

$$x_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

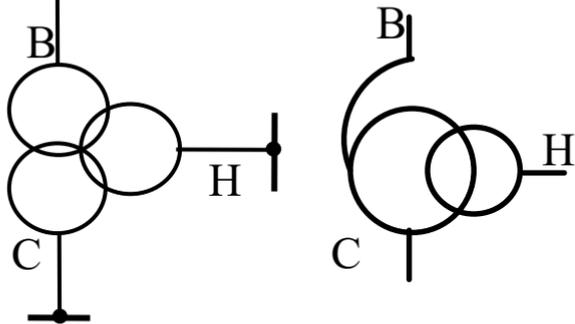
реактивное сопротивление

где  $u_k$  % - напряжение КЗ;  $\Delta P_k$  - активной мощности (потери КЗ); это паспортные данные

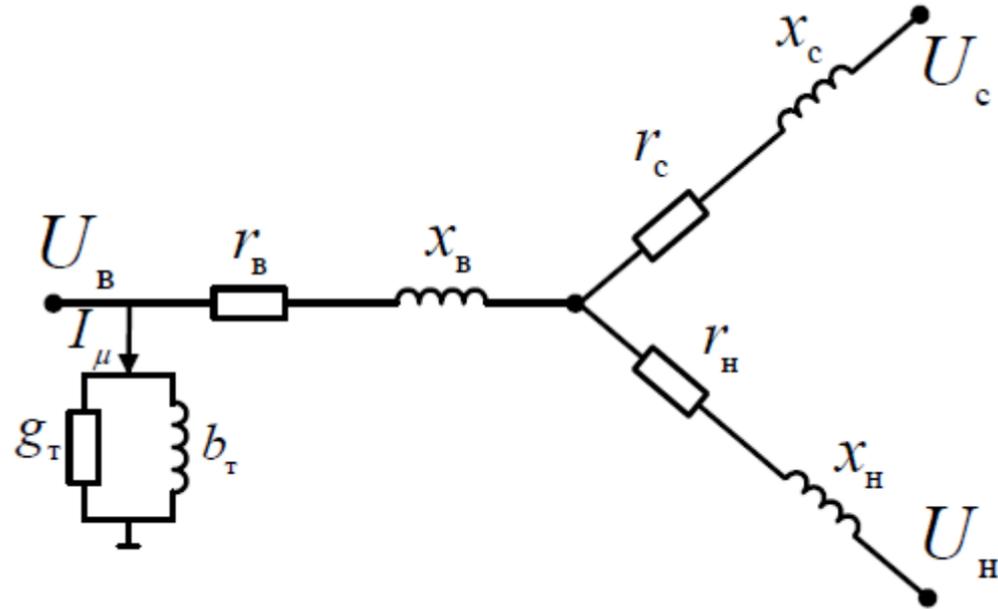
Для трансформаторов с  $U_{\text{ВН}} = 110$  кВ и выше принимают  $R_T = 0$   
Реактивное сопротивление приравнивают к полному  $x_T \approx Z_T$



# Трехобмоточный трансформатор и автотранс-тор

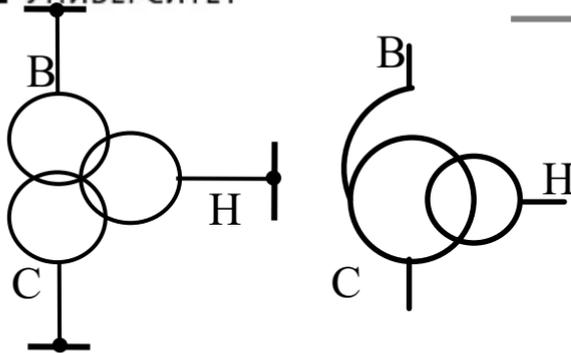


а) принципиальная схема

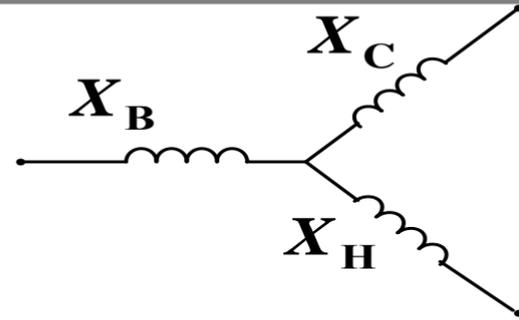


б) полная схема замещения

## Трехобмоточный трансформатор и автотранс-тор



а) принципиальная схема



б) упрощенная схема замещения

Напряжения КЗ и реактивности лучей схемы замещения (Ом):

$$U_{K(B)} = 0,5 [U_{K(B-C)} + U_{K(B-H)} - U_{K(C-H)}]$$

$$U_{K(C)} = 0,5 [U_{K(B-C)} + U_{K(C-H)} - U_{K(B-H)}]$$

$$U_{K(H)} = 0,5 [U_{K(B-H)} + U_{K(C-H)} - U_{K(B-C)}]$$

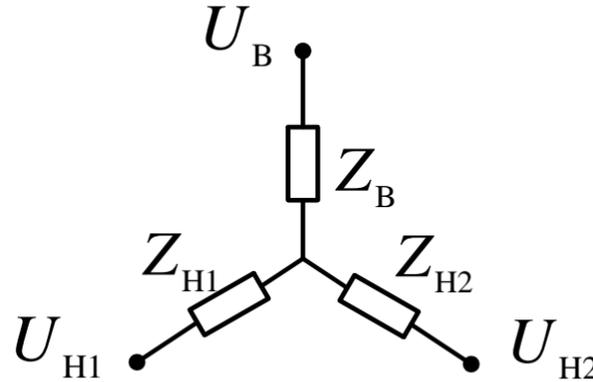
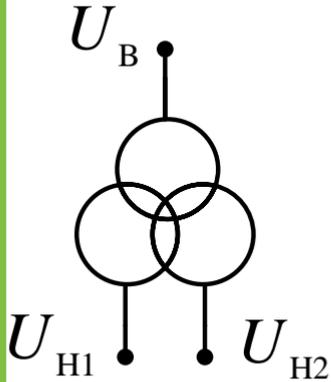
$$x_{B(\text{очн.})} = \frac{U_{K(B)} U_{\text{ср(очн.)}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$$

$$x_{C(\text{очн.})} = \frac{U_{K(C)} U_{\text{ср(очн.)}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$$

$$x_{H(\text{очн.})} = \frac{U_{K(H)} U_{\text{ср(очн.)}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$$



# Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой



$$\left. \begin{aligned}
 x_{B(\text{осн.})} &= \frac{U_{K(B-H)}}{100} \left( 1 - \frac{K_p}{4} \right) \frac{U_{\text{ср(осн.)}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \\
 x_{H1(\text{осн.})} &= x_{H2(\text{осн.})} = \frac{U_{K(B-H)}}{100} \frac{K_p}{2} \frac{U_{\text{ср(осн.)}}^2}{S_{\text{НОМ}}}
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 &K_p = U_{K(H1-H2)} / U_{K(B-H)} \\
 &(\text{Ом}) \\
 &K_p = 3,5 \\
 &\text{При отсутствии данных}
 \end{aligned}$$

### 3. Синхронный генератор

Элемент схемы замещения	Параметр	
Синхронные машины	$P_{\text{НОМ}}$	Номинальная активная мощность, МВт
	$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$	Номинальный коэффициент мощности
	$U_{\text{НОМ}}$	Номинальное напряжение, кВ
	$I_{\text{НОМ}}$	Номинальный ток статора, кА
	$X_d''$	Сверхпереходное индуктивное сопротивление прямой последовательности по продольной оси, Ом
	$X_2$	Сверхпереходное индуктивное сопротивление обратной последовательности по продольной оси, Ом
	$X_0$	Сверхпереходное индуктивное сопротивление нулевой последовательности по продольной оси, Ом



### 3. Синхронный генератор

В расчетах установившегося режима синхронный генератор учитывается синхронной ЭДС  $E_q$  и синхронной реактивностью  $x_d$ . В момент КЗ  $E_q$  и напряжение на выводах генератора мгновенно изменяются так, что их измененные значения неизвестны и, поэтому, не могут быть использованы для расчета режима КЗ. Ниже приведены параметры (ЭДС и сопротивления), которыми необходимо учитывать СГ в расчетах режимов КЗ.

Указанные параметры СГ в относительных единицах в среднем составляют:

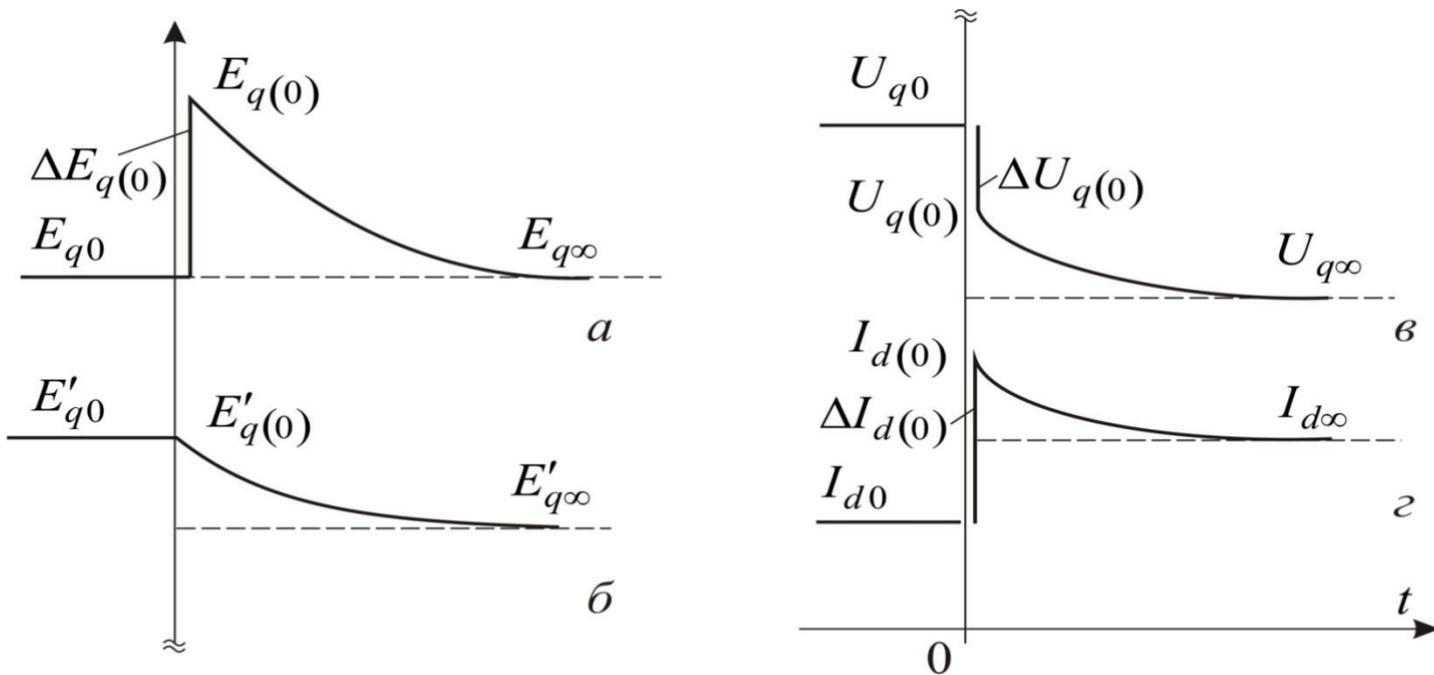
$$U = 1,0$$

$$E_q = 2,15$$

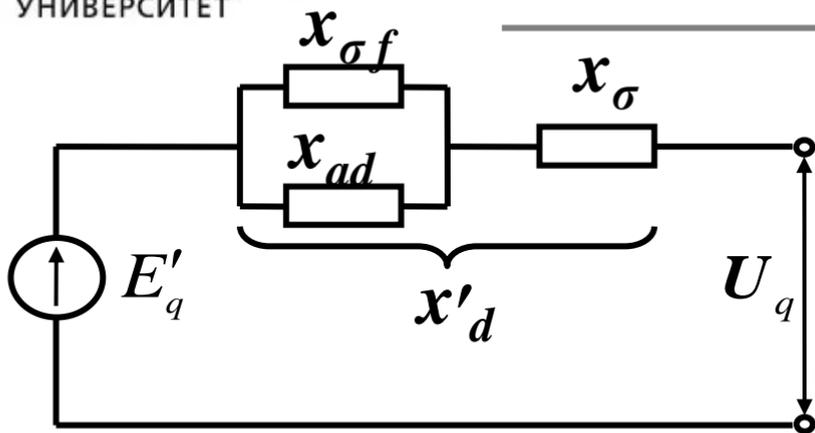
$$x_d = x_q = 1,45$$

### 3. Синхронный генератор

## Изменение параметров в продольной оси СМ в переходном режиме



### 3. Синхронный генератор



Двухконтурная схема  
замещения СМ в продольной  
оси при отсутствии  
демпферных обмоток

$$x'_d = x_{\sigma} + x_{ad} // x_{\sigma f}$$

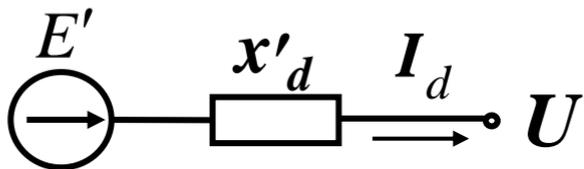


Схема замещения СМ без демпферных  
обмоток в расчетах режимов КЗ

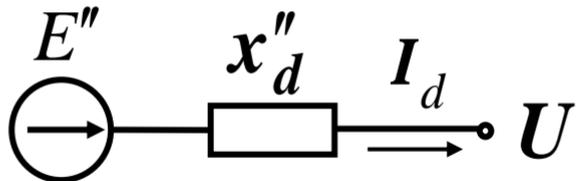


Схема замещения СМ с демпферными  
обмотками в расчетах режимов КЗ



### 3. Синхронный генератор

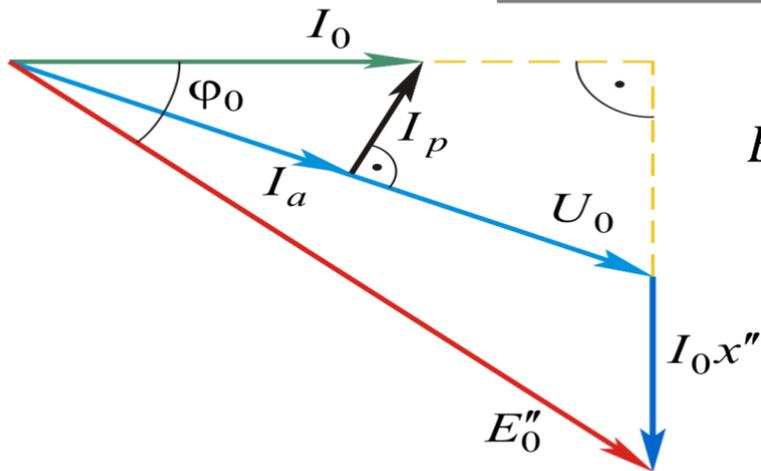
#### Условные обозначения параметров схем замещения

- $x_{\sigma}$  сопротивление рассеяния обмотки статора
- $x_{ad}$  сопротивление взаимоиндукции обмотки статора и возбуждения
- $x_{\sigma f}$  сопротивление рассеяния обмотки возбуждения
- $x'_d$  переходное сопротивление по оси  $d$  (паспортный параметр)
- $E'$  переходная ЭДС (расчетный параметр)
- $x''_d$  сверхпереходное сопротивление по оси  $d$
- $E''$  сверхпереходная ЭДС (расчетный параметр)

Усредненные значения переходных и сверхпереходных параметров СГ:

$$E' \approx 1.09 \quad x'_d = 0.15 \div 0.37 \quad x''_d \approx (0.14 \div 0.27)$$

### 3. Синхронный генератор



$$E''_{(0)} = \sqrt{(U_0 \cos \varphi)^2 + (U_0 \sin \varphi + I_0 x''_d)^2}$$

Переходная и сверхпереходная ЭДС  $E'_{(0)}$  и  $E''_{(0)}$  рассчитываются по параметрам нормального режима, предшествующего КЗ. В начальный момент внезапного нарушения режима эти ЭДС остаются неизменными; в этом состоит их практическая ценность. Это свойство позволяет использовать эти ЭДС для расчета периодической слагаемой тока КЗ для  $t = 0$ .



## 4. Синхронные и асинхронные двигатели

Элемент схемы замещения	Параметр	
Асинхронные электродвигатели	$P_{\text{НОМ}}$	Номинальная активная мощность, МВт
	$U_{\text{НОМ}}$	Номинальное напряжение, кВ
	$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$	Номинальный коэффициент мощности
	$I_{\text{НОМ}}$	Номинальный ток, кА
	$X''_{\text{АД}}$	Сверхпереходное индуктивное сопротивление электродвигателя, Ом
	$I_{\text{П}}$	Кратность пускового тока по отношению к номинальному току



## 4. Синхронные и асинхронные двигатели

Несмотря на конструктивное отличие синхронного (СД) и асинхронного (АД) двигателей от СГ, они имеют единый принцип электромагнитного взаимодействия статорных и роторных контуров, благодаря чему в начальный момент КЗ синхронные и асинхронные двигатели также характеризуются сверхпереходными ЭДС и сопротивлением.

В паспортных данных для СД и АД вместо сверхпереходного реактанса может приводиться пусковой ток. Относительное значение сверхпереходной реактивности определится так:

$$x''_{\text{ном}} = 1 / I_{\text{пуск}^*_{\text{ном}}},$$

где  $I_{\text{пуск}^*_{\text{ном}}} = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$  – кратность пускового тока.



## 4. Синхронные и асинхронные двигатели

$$E''_0 = E''_{(0)} = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 \pm I_0 x'' )^2},$$

где  $U_0, I_0, \varphi_0$  – параметры режима, предшествующего КЗ.

Характерными режимами работы СД в нормальном рабочем состоянии являются: режим **недовозбуждения** и режим **перевозбуждения**.

Для рабочего состояния СД в режиме **перевозбуждения**

$E_q > U_0$  и он посылает реактивный ток во внешнюю сеть.

СД в режиме **недовозбуждения**, а также АД характеризуются тем, что  $E_q < U_0$  и они потребляют реактивный ток из сети.

При КЗ  $U_0$  резко снижается, а  $E''_0 = E''_{(0)}$  остается неизменной. При выполнении условия  $E'' > U_{(0)}$  СД и АД переходят в генераторный режим и посылают реактивный ток к месту КЗ.



## 4. Синхронные и асинхронные двигатели

Отечественной промышленностью осуществляется выпуск синхронных и асинхронных двигателей, приведенных в табл.

Тип двигателей	Напряжение, кВ	Мощность двигателей, $P$ кВт
Синхронный (СТД)	6 - 10	315 – 31500
Асинхронный (АТД)	6 - 10	200 - 8000
	0,38; 0,66	7,5 - 315

В расчете режима  $K^{(3)}$  учитывается подпитка двигательной нагрузки, расположенная на ступени 6 (10) кВ и связанная с местом КЗ непосредственно или через кабельную линию (при единичной мощности двигателя 600 кВт и более).

Учет подпитки асинхронной двигательной нагрузки, расположенной на ступени 0,38 (0,66) кВ производится при расчетах наиболее тяжелых режимов  $K^{(3)}$  при единичной мощности двигателя 15 кВт и более).



## 4. Синхронные и асинхронные двигатели

Средние значения  $x''$  и  $E''$  (в о.е. при номинальных условиях)

Элементы ЭС	$x''$	$E''$
1. Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	0,125	1,08
2. Турбогенераторы мощностью 100-500 МВт	0,2	1,13
3. Гидрогенераторы с демпферными обмотками	0,2	1,13
4. Гидрогенераторы без демпферных обмоток	0,27	1,18
5. Синхронный двигатель	0,2	1,1
6. Синхронный компенсатор	0,2	1,2
7. Асинхронный двигатель	0,2	0,9
8. Обобщенная нагрузка	0,35	0,85



## 5. Токоограничивающие реакторы

### 6. Электроэнергетическая система (ЭЭС)

## 5. Токоограничивающие реакторы

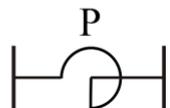
Элемент схемы замещения	Параметр	
Токоограничивающие реакторы	$X_p$	Номинальное индуктивное сопротивление, Ом
	$I_{ном}$	Номинальный ток, кА
	$\Delta P$	Потери мощности (на фазу) при номинальном токе, кВт
	$K_{св}$	Номинальный коэффициент связи

## 6. Электроэнергетическая система (ЭЭС)

Элемент схемы замещения	Параметр	
Электроэнергетическая система	$E_c$	Эквивалентная ЭДС, В
	$S_{кз}$	Мощность при трехфазном КЗ в узле присоединения системы электроснабжения к рассматриваемому участку



## 5. Токоограничивающие реакторы



Учитываются только реактивным сопротивлением, которое может быть задано в  $x_p$  Ом или  $x_p$  %

$$\text{В последнем случае: } x_p = \frac{x_p \% U_{\text{НОМ}}}{100 \sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} = \frac{x_p \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$$

## 6. Электроэнергетическая система (ЭЭС)

Сложную электроэнергетическую систему, питающую систему электроснабжения предприятия принято в расчетах режимов КЗ учитывать эквивалентной ЭДС  $E_c$  и реактивностью  $x_c$ , которая рассчитывается по заданной мощности КЗ  $S_{\text{КЗ}}^{(3)}$

$$x_c = E_c^2 / S_{\text{КЗ}}^{(3)} \text{ Ом.}$$



## 7. Системы электроснабжения

---

В случае, когда расчет параметров переходного режима СЭС производится только для ее небольшой части, вся оставшаяся часть системы электроснабжения представляется в виде упрощенной схемы, состоящей из одного источника с неизменной ЭДС ( $E_C$ ), приложенной за эквивалентной индуктивностью ( $x_C$ ).

Если известна величина начального тока  $I_{K3}$  или мощности  $S_{K3}$  при трехфазном КЗ в узле присоединения системы электроснабжения к рассматриваемому участку, то реактивность СЭС определяется по выражению

$$x_C = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3}I_{K3}} = \frac{U_{cp}^2}{S_{K3}}$$

где  $U_{cp}$  – среднее номинальное напряжение ступени, соответствующее  $I_{K3}$ . За этой реактивностью считают подключенным источник бесконечной мощности с  $E_C = U_{cp}$ .



## 7. Системы электроснабжения

---

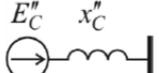
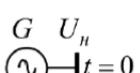
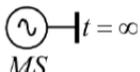
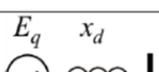
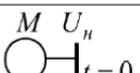
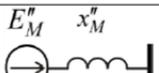
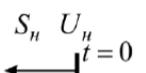
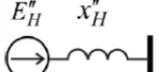
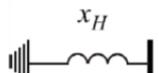
Перед расчетом переходного процесса в системе электроснабжения на основе ее принципиальной схемы составляют расчетную схему, в которую входят только те элементы, по которым возможно протекание аварийных токов и их составляющих.

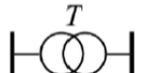
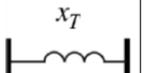
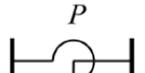
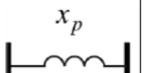
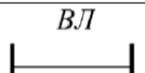
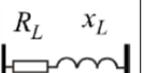
При наличии в расчетной схеме трансформаторов целесообразно имеющиеся в ней магнитно-связанные цепи представлять одной эквивалентной электрически связанной цепью (приведением к одной ступени напряжения).

Схема замещения СЭС – это соединение схем замещения отдельных ее элементов.

После составления схемы замещения рассчитываются ее параметры в именованных или относительных единицах, затем полученные значения приводятся к одной ступени напряжения.

## 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			$R_L = r_0 l$ $x_L = x_0 l$
			



## Система относительных единиц

---

Применение относительных (безразмерных) единиц позволяет быстро сопоставить результаты вычислений для различных точек системы.

Подобная система единиц может применяться как в **относительно номинальном варианте**, где за основу принимаются параметры наиболее ответственного элемента (генератор, трансформатор), так и в **относительно базисном варианте**. В этом случае за основу принимаются две базисные единицы, остальные получаются из принятых. Приняв за базисные величины в качестве единиц измерения междуфазное напряжение  $U_6$  и базисную мощность трехфазной системы  $S_6$ , через обычные соотношения получим:



## Основные термины

---

**базисный ток на расчетной ступени, кА**

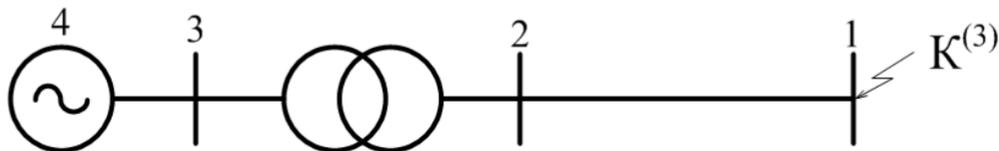
$$I_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3}U_{\bar{o}}}$$

**базисное сопротивление на расчетной ступени, Ом:**

$$Z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3}I_{\bar{o}}} = \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{\bar{o}}}$$



Для схемы, изображенной на рисунке, произвести расчет периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания, ударного тока, постоянной времени апериодической составляющей тока короткого замыкания;



$$x_d'' = 0,2 \text{ о.е.}, U_{\Gamma_{\text{НОМ}}} = 10,5 \text{ кВ}, S_{\Gamma_{\text{НОМ}}} = 50 \text{ МВА}$$

$$U_{\text{НН}} = 10,5 \text{ кВ}, U_{\text{ВН}} = 230 \text{ кВ}, U_{\text{к}} = 12 \%, S_{\text{тр}} = 100 \text{ МВА}$$

$$L = 30 \text{ км}, x_{1(L)} = 0,5 \text{ Ом/км}$$