



# Переходные процессы в системах электроснабжения

## ЛЕКЦИЯ № 8

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



## Однократная продольная несимметрия

---

**Продольная несимметрия** возникает в электрической сети при обрыве одной или двух фаз, а также при включении в фазы неодинаковых сопротивлений.

**Продольная несимметрия** может быть следствием *поперечной несимметрии*. Воздушные линии электропередачи высокого и сверхвысокого класса напряжения снабжены пофазным управлением. В этих условиях, при возникновении несимметричного короткого замыкания на ВЛ релейная защита отключает поврежденную фазу, а при одновременном повреждении двух фаз – обе фазы, оставляя в работе «здоровые» фазы. При одноцепных линиях электропередачи этим избегается потеря связи между отдельными станциями. В условиях эксплуатации пофазное отключение производится не только в аварийных ситуациях, а так же в целях проведения ремонтных, профилактических и испытательных работ.



## Однократная продольная несимметрия

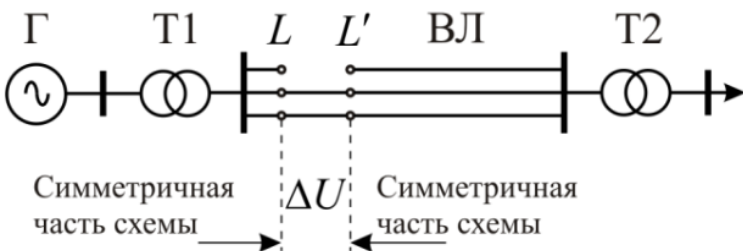
Исследование режимов при продольной несимметрии также удобно вести на основе **метода симметричных составляющих**.

Для этого предполагают, что несимметрия имеет *местный* (сосредоточенный характер), а вся система продолжает оставаться *конструктивно симметричной*.

Основные уравнения падений напряжения в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей, составленные для симметричной части схемы (см. рис.) имеют вид, аналогичный для *поперечной несимметрии*:

$$\left. \begin{aligned} U_{K1} &= E_{\Sigma} - I_{K1} j x_{1\Sigma}, \\ U_{K2} &= 0 - I_{K2} j x_{2\Sigma}, \\ U_{K0} &= 0 - I_{K0} j x_{0\Sigma}. \end{aligned} \right\}$$

## Однократная продольная несимметрия



$$\Delta U_{L1} = E_{1\Sigma} - I_{L1} j x_{L1\Sigma};$$

$$\Delta U_{L2} = 0 - I_{L2} j x_{L2\Sigma};$$

$$\Delta U_{L0} = 0 - I_{L0} j x_{L0\Sigma},$$

где  $\Delta U_{L1}$ ,  $\Delta U_{L2}$ ,  $\Delta U_{L0}$  – симметричные составляющие падения напряжения особой фазы **A** на несимметричном участке системы,  
 $x_{L1\Sigma}$ ,  $x_{L2\Sigma}$ ,  $x_{L0\Sigma}$  – результирующие реактивности схем соответствующих последовательностей относительно клемм продольной несимметрии  $L-L'$ .  
**Индекс  $L$  является символом продольной несимметрии.**



## Однократная продольная несимметрия

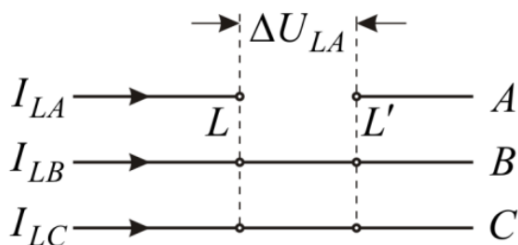
---

Дополнительные связи между симметричными составляющими токов и падений напряжений устанавливаются из **граничных условий** рассматриваемой продольной несимметрии подобно тому, как это имело место при *поперечной несимметрии*.

Ниже рассматриваются основные расчетные выражения соответствующие:

- а) обрыву одной или двух фаз;
- б) включению в одну или две фазы дополнительных сопротивлений.

## Разрыв одной фазы



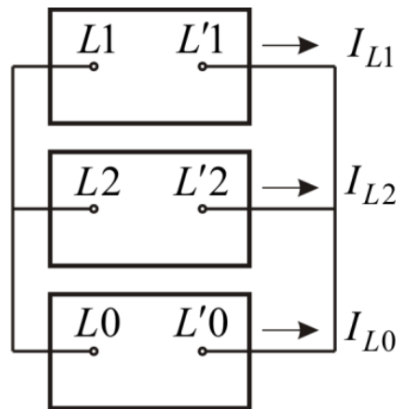
Место несимметрии

$$\Delta U_{La1} = \Delta U_{La2} = \Delta U_{La0} = \frac{1}{3} \Delta U_{LA}$$

$$\mathbf{I}_{La1} + \mathbf{I}_{La2} + \mathbf{I}_{L0} = 0$$

$$\mathbf{I}_{La2} = -\frac{\Delta U_{La1}}{jx_{L2\Sigma}}$$

$$\mathbf{I}_{L0} = -\frac{\Delta U_{La1}}{jx_{L0\Sigma}}$$



Комплексная схема замещения

$$\Delta U_{La1} = \mathbf{I}_{La1} jx_{\Delta L}$$

$$x_{\Delta L} = x_{L2\Sigma} // x_{L0\Sigma}$$

$$\mathbf{I}_{La1} = \frac{\mathbf{E}_{1\Sigma}}{j(x_{L1\Sigma} + x_{\Delta L})}$$

Граничные условия  
в месте разрыва одной фазы

$$\mathbf{I}_{LA} = 0;$$

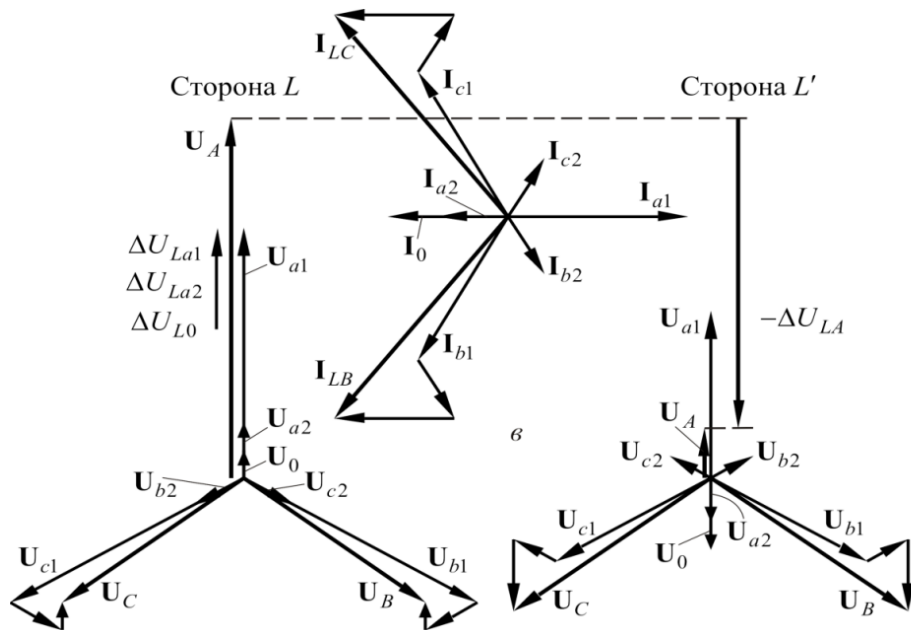
$$\Delta U_{LB} = 0;$$

$$\Delta U_{LC} = 0.$$

$$\mathbf{I}_{La2} = -\mathbf{I}_{La1} \frac{x_{L0\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} = -\mathbf{I}_{La1} \frac{x_{\Delta L}}{x_{L2\Sigma}}$$

$$\mathbf{I}_{L0} = -\mathbf{I}_{La1} \frac{x_{L2\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} = -\mathbf{I}_{La1} \frac{x_{\Delta L}}{x_{L0\Sigma}}$$

$$\Delta U_{LA} = 3\Delta U_{La1} = 3\mathbf{I}_{La1} jx_{\Delta L}$$



$$\mathbf{I}_{LB} = a^2 \mathbf{I}_{La1} + a \mathbf{I}_{La2} + \mathbf{I}_{L0} = \left( a^2 - \frac{x_{L2\Sigma} + a x_{L0\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} \right) \mathbf{I}_{La1}$$

$$\mathbf{I}_{LC} = \left( a - \frac{x_{L2\Sigma} + a^2 x_{L0\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} \right) \mathbf{I}_{La1}$$

$$|I_{LB}| = |I_{LC}| = m^{(1.1)} I_{La1}$$

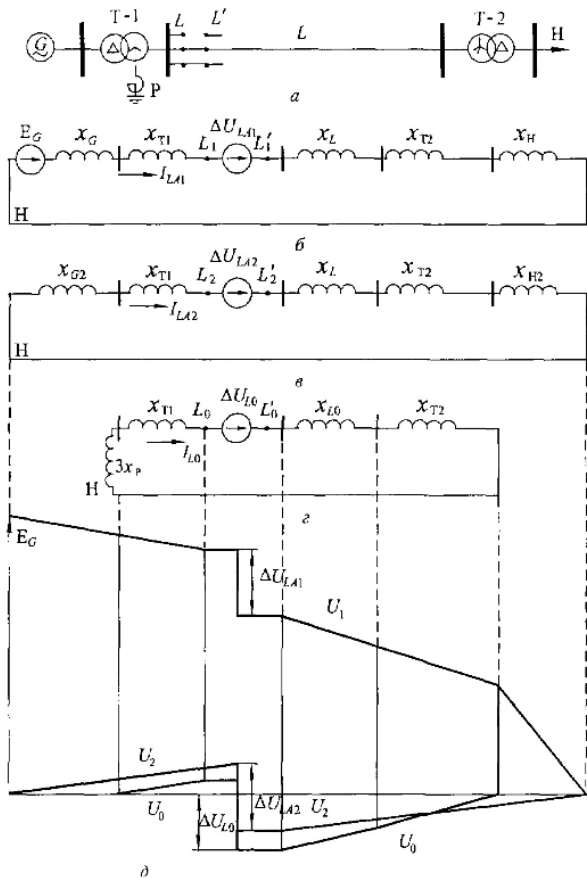
$$m^{(1.1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{L2\Sigma} x_{L0\Sigma}}{(x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma})^2}}$$

$$1.5 \leq m^{(1.1)} \leq \sqrt{3}$$

Векторные диаграммы напряжений и токов в точке разрыва при разрыве одной фазы



## Несимметрия от включения сопротивлений



**Распределение симметричных составляющих напряжений при разрыве одной фазы:**

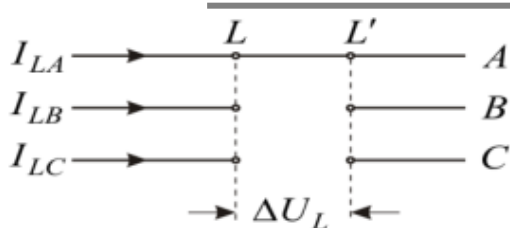
а – принципиальная схема,  
 б, в, г – схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей,  
 д – эпюры напряжений





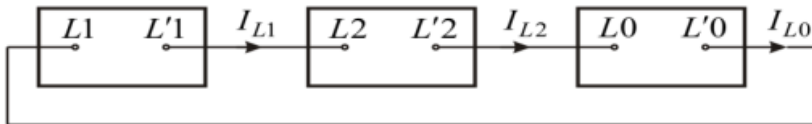
## Разрыв двух фаз

Место  
несимметрии



Граничные условия  
в месте разрыва одной фазы

$$\begin{aligned}\Delta U_{LA} &= 0; \\ \mathbf{I}_{LB} &= 0; \\ \mathbf{I}_{LC} &= 0.\end{aligned}$$



Комплексная схема замещения

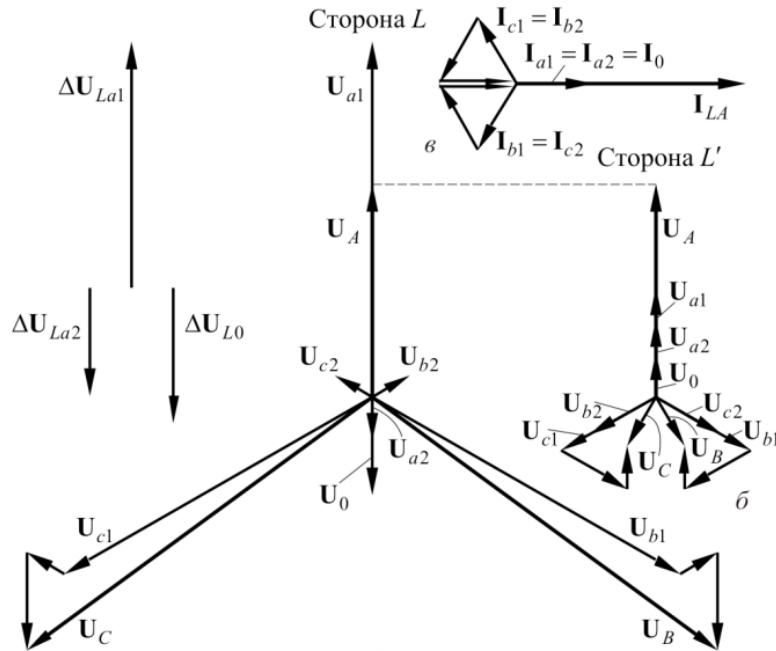
$$\begin{aligned}\mathbf{I}_{La1} &= \mathbf{I}_{La2} = \mathbf{I}_{L0} = \frac{1}{3} \mathbf{I}_{LA} \\ \Delta U_{La1} + \Delta U_{La2} + \Delta U_{L0} &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_{La1} &= \frac{\mathbf{E}_{1\Sigma}}{j(x_{L1\Sigma} + x_{\Delta L})} \\ x_{\Delta L} &= x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}\end{aligned}$$

$$\mathbf{I}_{LA} = 3\mathbf{I}_{La1}$$

$$\left. \begin{aligned}\Delta U_{La1} &= \mathbf{I}_{La1} j x_{\Delta L}; \\ \Delta U_{La2} &= -\mathbf{I}_{La1} j x_{L2\Sigma}; \\ \Delta U_{L0} &= -\mathbf{I}_{La1} j x_{L0\Sigma}.\end{aligned} \right\}$$

## Разрыв двух фаз



Все расчетные выражения для симметричных составляющих токов и падений напряжений для разрыва двух фаз ( $L^{(2)}$ ) полностью идентичны случаю однофазного короткого замыкания на землю ( $K^{(1)}$ ), что находит свое подтверждение и в комплексной схеме замещения.

Векторные диаграммы напряжений и токов в точке разрыва при разрыве двух фаз



## Однократная продольная несимметрия

### Правило эквивалентности прямой последовательности для однократной продольной несимметрии

Из структуры выражений для тока прямой последовательности, при рассмотренных видах однократной продольной несимметрии, можно сделать вывод, что ток прямой последовательности при любом виде продольной несимметрии можно определить как ток симметричного трехфазного режима в схеме, где несимметричный участок заменен симметричной цепью, величина сопротивления которого для каждого вида продольной несимметрии определяется сопротивлениями как самого несимметричного участка, так и схем обратной и нулевой последовательностей относительно места несимметрии.

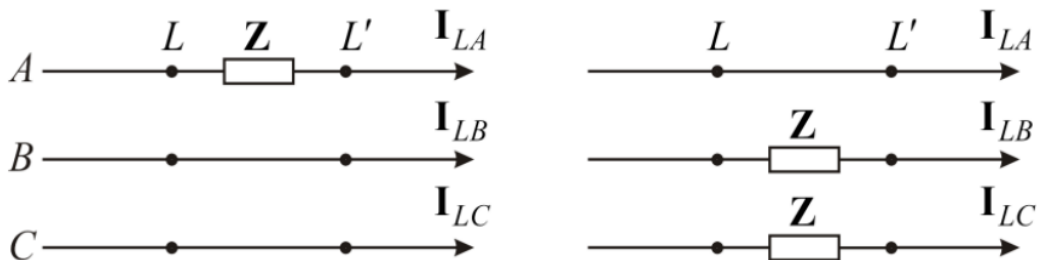
Изложенное положение представляет собой **правило эквивалентности прямой последовательности применительно к условиям однократной продольной несимметрии** и может быть записано в общем виде как

$$\mathbf{I}_{LA1}^{(n)} = \frac{\mathbf{E}_{A\Sigma}}{j \left( x_{L1\Sigma} + x_{\Delta L}^{(n)} \right)}$$



1. Составляются схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, в которых в месте разрыва включены ЭДС  $\Delta U_{LA1}$ ,  $\Delta U_{LA2}$ ,  $\Delta U_{LA0}$ .
2. Определяются суммарные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно точек разрыва и эквивалентное ЭДС схемы прямой последовательности  $E_{1\Sigma}$ .
3. Определяется добавочное сопротивление  $x_{\Delta L}^{(n)}$  и ток прямой последовательности  $I_{LA1}^{(n)}$ .
4. Через  $I_{LA1}^{(n)}$  определяют остальные симметричные составляющие, а также фазные значения токов и падений напряжений в месте несимметрии.

## Несимметрия от включения сопротивлений



Несимметрия от включения сопротивлений  
в одну фазу в две фазы

Рассмотрим продольную несимметрию, обусловленную включением в одну или две фазы сопротивления  $Z$ . Такие условия могут возникнуть при неодновременном расхождении контактов выключателя, когда отключение сопровождается дуговыми явлениями.

Граничные условия для рассматриваемых случаев имеют следующий вид:

– при включении сопротивления в одну фазу (A)

$$\Delta U_{LA} = Z I_{LA}, \Delta U_{LB} = 0, \Delta U_{LC} = 0,$$

– при включении сопротивления в две фазы (B, C)

$$\Delta U_{LA} = 0, \Delta U_{LB} = Z I_{LB}, \Delta U_{LC} = Z I_{LC}.$$



## Несимметрия от включения сопротивлений

---

Совместное решение уравнений с учетом соответствующих граничных условий, аналогично тому, как это делалось ранее.

Разрыв одной или двух фаз является частным случаем рассматриваемой несимметрии: расчетные выражения для случая обрыва можно получить, полагая  $Z = \infty$ .



## ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

---

Токи короткого замыкания оказывают негативное влияние на электротехническую аппаратуру. Оно проявляется в виде:

- **электродинамического воздействия**, которое пропорционально ударному току КЗ;
- **термического воздействия**, которое оценивается по тепловому импульсу  $B_k \equiv I_{II}^2 t_{откл}$ , где  $t_{откл}$  – определяется временем действия средств релейной защиты ( $t_{рз}$ ) и собственным временем отключения коммутационной аппаратуры ( $t_{ка}$ ).

Снижение опасного воздействия КЗ сводится как к снижению уровня тока короткого замыкания, так и продолжительности его существования.



## Ограничение токов короткого замыкания

---

Анализ динамики статистических данных энергосистем по уровню токов КЗ позволяет сделать следующие выводы:

**1. Максимальные значения токов КЗ в сетях напряжением  $U \geq 35$  кВ постоянно растут.**

Это вызвано развитием сети – вводом в эксплуатацию новых линий электропередачи и трансформаторов, что уменьшает суммарное сопротивление короткозамкнутой цепи: источник – точка КЗ.





## Ограничение токов короткого замыкания

---

### **2. В сетях напряжением 110 кВ ток однофазного КЗ практически равен току трехфазного.**

В сетях 220 кВ и выше токи однофазного КЗ превосходят токи трехфазного. Это обусловлено малыми значениями суммарного сопротивления нулевой последовательности, которое существенно зависит от числа и мест расположения заземленных нейтралей. Росту токов однофазного КЗ способствует ввод блоков турбогенераторов большой мощности (300 – 800 МВт), которые требуют, как правило, заземления нейтралей блочных трансформаторов. Тот же эффект дает широкое использование силовых автотрансформаторов, работающих с заземленными нейтралями. Частота однофазных КЗ существенно превышает трехфазные, что в указанных условиях усложняет работу выключателей и сокращает их ресурс.



## Ограничение токов короткого замыкания

---

В связи с ростом уровней токов КЗ в последние годы стали весьма актуальными вопросы воздействия токов короткого замыкания не только на жесткие шины, кабели и электрические аппараты, но и на генераторы, силовые трансформаторы, а также гибкие проводники электроустановок.

Согласно Правилам устройств электроустановок, гибкие шины распределительных устройств, а также провода воздушных ЛЭП должны проверяться на возможность схлестывания или опасного сближения в результате их раскачивания под воздействием электродинамических сил

при  $I_{\Pi}^{(3)} \geq 20$  кА,

$i_y \geq 50$  кА.



## Ограничение токов короткого замыкания

---

Ограничению токов КЗ в энергосистемах всегда уделяется большое внимание. Для этого применяются как **схемные решения**, так и **специальные устройства**. Наиболее широко используются:

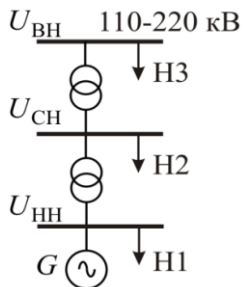
- *оптимизация структуры и параметров сети;*
- *стационарное и автоматическое деление сети;*
- *токоограничивающие устройства;*
- *оптимизация режима заземления нейтралей в электрических сетях.*

В зависимости от местных условий, требуемой степени ограничения токов, а также технико-экономических показателей используются различные средства, дающие наибольший эффект.

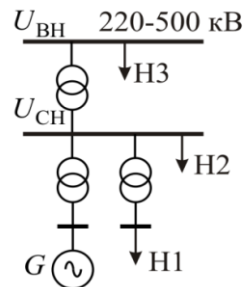
**Схемные решения** принимаются, как правило, на стадии проектирования схем развития энергосистем, при этом выбираются оптимальные схемы выдачи мощности электростанций и параметры элементов сетей энергосистем.

Динамика схемных решений исторически связана с укрупнением единичной мощности электростанций. Ввод в эксплуатацию генераторов мощностью 300 – 1200 МВт и укрупнение единичных мощностей электростанций до 3600 – 6400 МВт привели к вынужденному переходу.

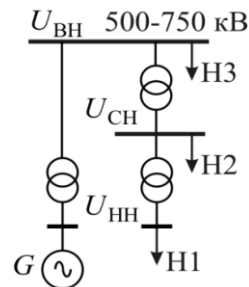
## Схемы выдачи мощности электростанций



*ТЭЦ  
с генераторами 30–100 МВт*



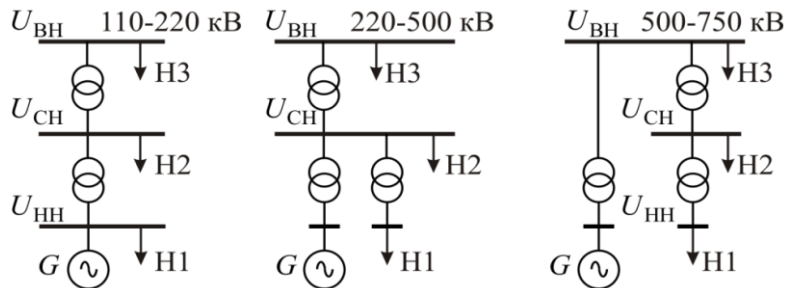
*блочные станции с  
генераторами 100–300 МВт*



*блочные станции с  
генераторами 500–1200 МВт*

## Оптимизация структуры сети (схемные решения)

### Схемы выдачи мощности электростанций



*ТЭЦ  
с генераторами 30–100 МВт*

*блочные станции с  
генераторами 100–300 МВт*

*блочные станции с  
генераторами 500–1200 МВт*

При схеме, характерной для **ТЭЦ с генераторами 30–100 МВт**, возникают трудности с ограничениями токов короткого замыкания в сетях низшего и среднего напряжений.

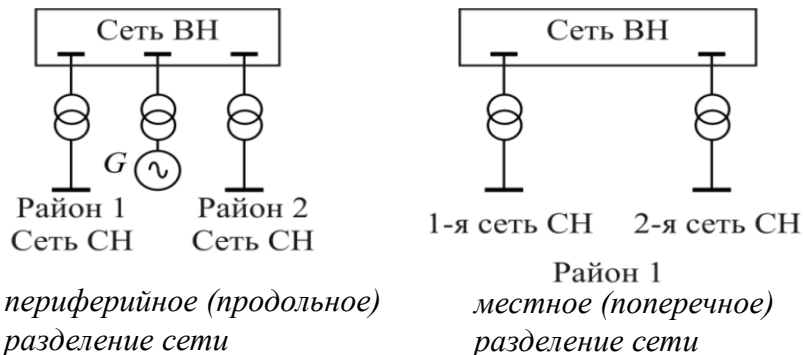
Для схемы с **блочными генераторами мощностью 100–300 МВт** наибольший рост токов КЗ наблюдается в сети среднего напряжения, меньший – в сети высшего напряжения; в сети же низшего напряжения уровень токов короткого замыкания стабилизируется.

В схеме с **блочными генераторами 500–1200 МВт** наибольший рост токов КЗ наблюдается в сетях высшего напряжения.



## Оптимизация структуры сети (схемные решения)

Эффективным схемным решением по ограничению токов короткого замыкания в распределительных сетях среднего и низшего класса напряжений является оптимизация структуры системы электроснабжения. С этой целью реализуют **периферийное (продольное) разделение сетей**. Оно применяется для распределительных сетей одного класса напряжения, принадлежащих различным территориальным районам. Связь этих сетей через сеть повышенного напряжения позволяет снизить уровень токов короткого замыкания.

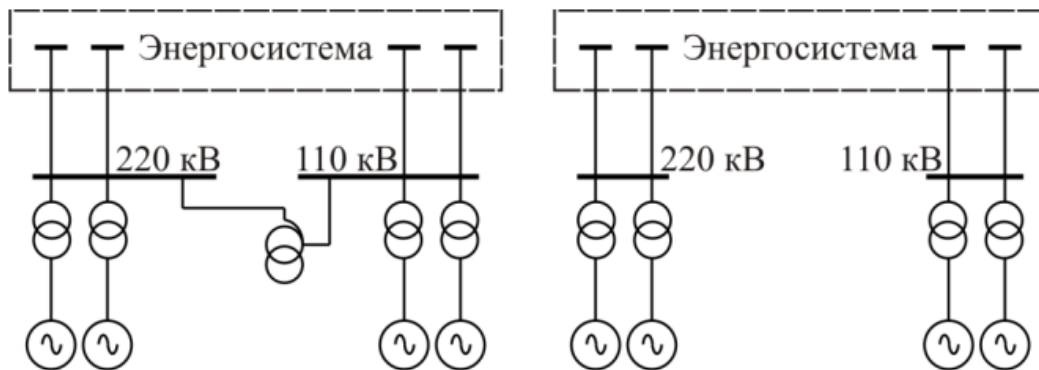


### Оптимизация структуры сети

**Местное, или поперечное, разделение сетей** – это электроснабжение единого территориального района двумя и более распределительными сетями одного и того же класса напряжения с их связью через сеть повышенного напряжения. Данное решение позволяет стабилизировать уровень токов короткого замыкания при значительном росте электропотребления.

**Деление сети** применяют в процессе эксплуатации, когда требуется ограничить уровни токов КЗ при ее развитии. Различают деление сети **стационарное (СДС)** и **автоматическое (АДС)**.

**Стационарное деление сети** осуществляется в нормальном режиме с помощью секционных, шиносоединительных или линейных выключателей. Оно производится тогда, когда уровень тока КЗ в узле сети превышает допустимые значения для параметров установленного оборудования. Пример деления сети на электростанции с двумя распределительными устройствами повышенного напряжения показан на рисунке. Деление производится посредством разрыва трансформаторной связи между распределительными устройствами 220 и 110 кВ. СДС оказывает существенное влияние на режимы, устойчивость и надежность работы электрической системы, а также на потери мощности в сетях.



**Стационарное деление сети на электростанции с двумя РУ повышенного напряжения:**

- исходная схема;
- разрыв автотрансформаторной связи между РУ двух классов напряжений



**Автоматическое деление сети** производится в аварийном режиме для обеспечения работы коммутационных аппаратов. Оно осуществляется на секционных или шиносоединительных выключателях, иногда на выключателях мощных присоединений.

При автоматическом делении сети образуется система каскадного отключения токов короткого замыкания, однако надо учитывать, что АДС имеет недостатки:

- 1) возможность появления в послеаварийном режиме значительных небалансов мощностей источников и нагрузки в разделившихся частях сети;
- 2) увеличение времени восстановления нормального режима.

Несмотря на это, устройства АДС широко применяются в энергосистемах, поскольку дешевы, просты и надежны.





## Токоограничивающие устройства

---

**Токоограничивающие устройства**, выполняя свою основную функцию – ограничение токов КЗ, не должны существенно влиять на нормальный режим работы сети и иметь стабильные характеристики при изменении схемы и параметров режима.

**Токоограничивающие реакторы**, используемые в настоящее время в энергосистемах, являются нерегулируемыми с линейной характеристикой.

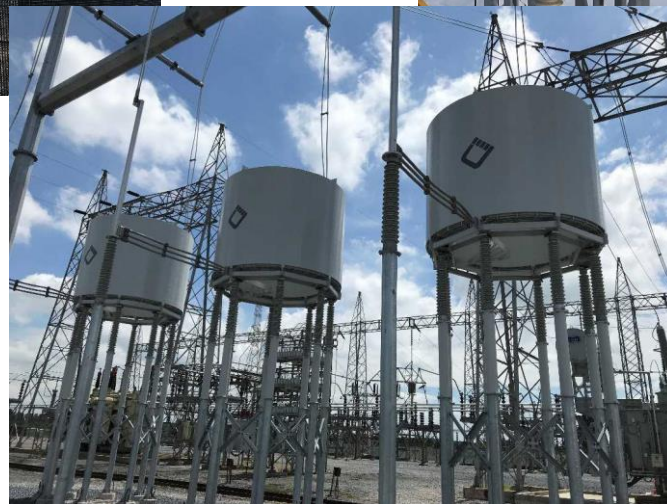
В сетях 6(10) кВ применяются одинарные и сдвоенные бетонные реакторы, а в сетях напряжением 35 – 220 кВ – одинарные с масляным охлаждением

Паспортными параметрами реакторов являются:

- номинальное напряжение  $U_{\text{НОМ}}$ ;
- номинальный ток  $I_{\text{НОМ}}$ ;
- индуктивное сопротивление  $x_p$  (в Омах или процентах).

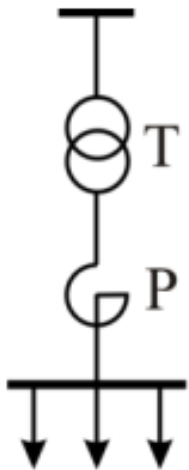


## Токоограничивающие устройства

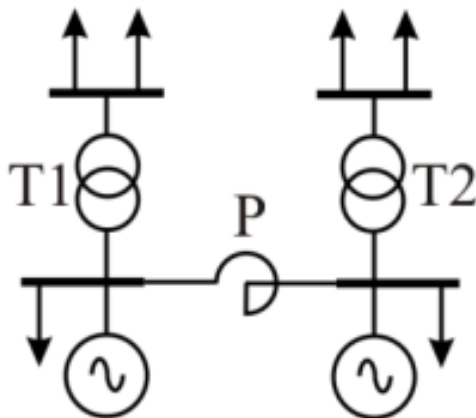


## Токоограничивающие устройства

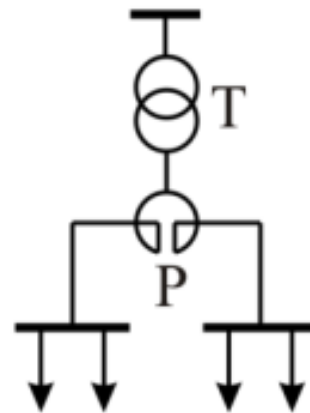
### Возможные схемы включения реакторов



*Линейный реактор*



*Секционный реактор*

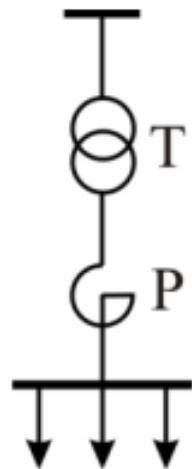


*Сдвоенный реактор*

## Токоограничивающие устройства

**Линейный реактор**, включаемый последовательно в линию (присоединение), ограничивает ток короткого замыкания и поддерживает относительно высокий уровень остаточного напряжения в узлах предвключенной сети. Последнее очень важно для электроприемников, подключенных по высшей стороне трансформатора.

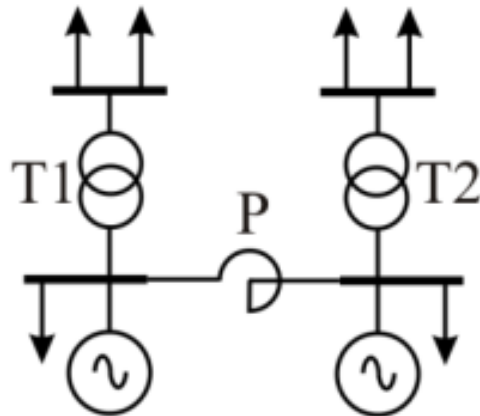
Однако в нормальном режиме имеют место потери активной и реактивной мощностей, а также падение напряжения. Сопротивление реактора выбирается по желаемому уровню тока или мощности короткого замыкания за линейным реактором. Токоограничивающее действие реактора снижается с увеличением его номинального тока, который должен соответствовать мощности электроприемников



## Токоограничивающие устройства

**Секционные реакторы** ограничивают ток короткого замыкания на сборных шинах и присоединениях.

По сравнению с линейными реакторами они оказывают меньшее токоограничивающее действие. Это обусловлено тем, что секционные реакторы рассчитываются на большие номинальные токи, которые протекают между секциями при нарушении нормального режима.



## Токоограничивающие устройства

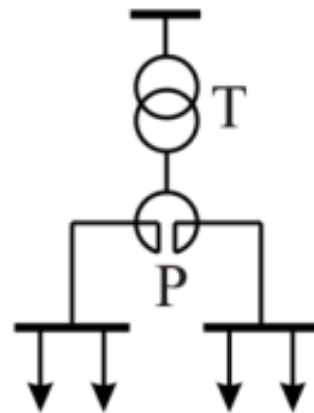
В отношении потерь напряжения и реактивной мощности лучшими характеристиками обладают **сдвоенные реакторы**.

В нормальном режиме магнитная связь между ветвями реактора уменьшает потерю напряжения в нем без снижения токоограничивающей способности. Коэффициент связи частей расщепленной обмотки определяется выражением:

$$k_{св} = M / \sqrt{L_1 L_2} = \omega M / x_{НОМ},$$

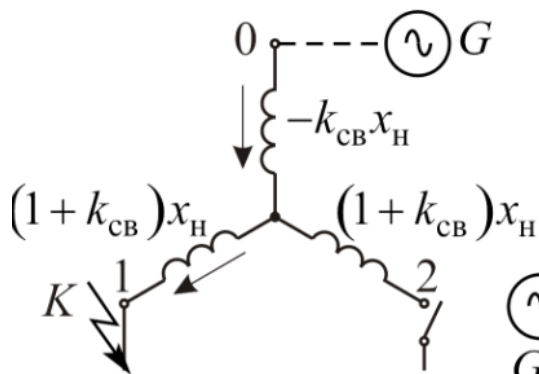
где  $M$  – взаимная индуктивность ветвей обмотки;

$L_1, L_2$  – собственные индуктивности ветвей.

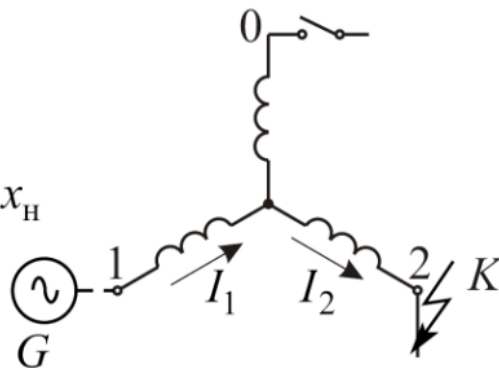


## Токоограничивающие устройства

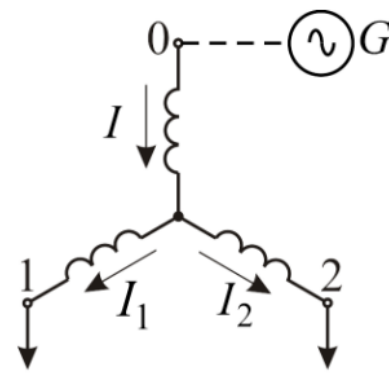
Исходная схема двоянного реактора представляет трехлучевую звезду



*одноцепный режим*



*продольный режим*



*двухцепный (сквозной) режим*



## Токоограничивающие устройства

В зависимости от схемы включения такой реактор работает в различных по токоограничению режимах, так как имеет различные результирующие сопротивления:

- в одноцепном режиме

$$x_P = (1 + k_{CB})x_{НОМ} - k_{CB}x_{НОМ} = x_{НОМ}$$

- в продольном режиме

$$x_P = 2(1 + k_{CB})x_{НОМ}$$

- в сквозном (двухцепном) режиме

$$x_P = x_{НОМ} - k_{CB}x_{НОМ} = (1 - k_{CB})x_{НОМ}$$

Недостатком сдвоенных реакторов является возможность повышения напряжения на слабо нагруженной ветви при работе в одноцепном и сквозном режимах за счет магнитной связи частей обмотки реактора.





## Токоограничивающие устройства

---

**Реакторы с нелинейной характеристикой.** К этой группе относятся управляемые и насыщающиеся реакторы.

**Управляемый реактор** – это регулируемый реактор со сталью, изменение сопротивления которого осуществляется подмагничиванием магнитопровода полем постоянного тока. В нормальном режиме сопротивление реактора снижается за счет подмагничивания. При КЗ сопротивление реактора увеличивается. Это увеличение характеризуется коэффициентом токоограничения, который составляет 4 – 7 единиц.

**Насыщающийся реактор** – это неуправляемый реактор со стальным магнитопроводом. Он имеет нелинейную характеристику  $x_p = f(I_p)$ , которая определяется насыщением магнитопровода полем обмотки переменного тока. Эквивалентное сопротивление реактора возрастает с увеличением тока; это свойство реактора используется для ограничения тока короткого замыкания.



## Токоограничивающие устройства

**Токоограничивающие коммутационные аппараты** ограничивают ток КЗ в течение первого полупериода его появления и далее отключают короткое замыкание. К ним относятся токоограничивающие предохранители и ограничители ударного тока взрывного действия.

**Токоограничивающие предохранители** изготавливаются на напряжение 3–35 кВ. Они отличаются простотой конструкции и небольшой стоимостью. Однако они имеют ряд существенных недостатков:

- одноразовое действие, что затрудняет применение автоматического повторного включения (АПВ);
- нестабильность токовременных характеристик;
- неуправляемость со стороны внешних устройств (релейной защиты), в связи с чем предохранители устанавливаются в цепях менее ответственных потребителей.





## Токоограничивающие устройства

**Ограничители ударного тока взрывного действия** – это сверхбыстродействующие управляемые коммутационные аппараты одноразового действия.

Конструктивно представляют герметизированный цилиндр, внутри которого располагается токоведущий проводник с пиропатроном.

Отключение цепи осуществляется разрушением токоведущего проводника. Сигнал на срабатывание поступает от устройства релейной защиты, контролирующего ток короткого замыкания и его первую производную (скорость нарастания тока). Ограничение тока достигается за время порядка 0.5 мс; полное время отключения цепи составляет около 5 мс, т. е. 14 периода промышленной частоты.





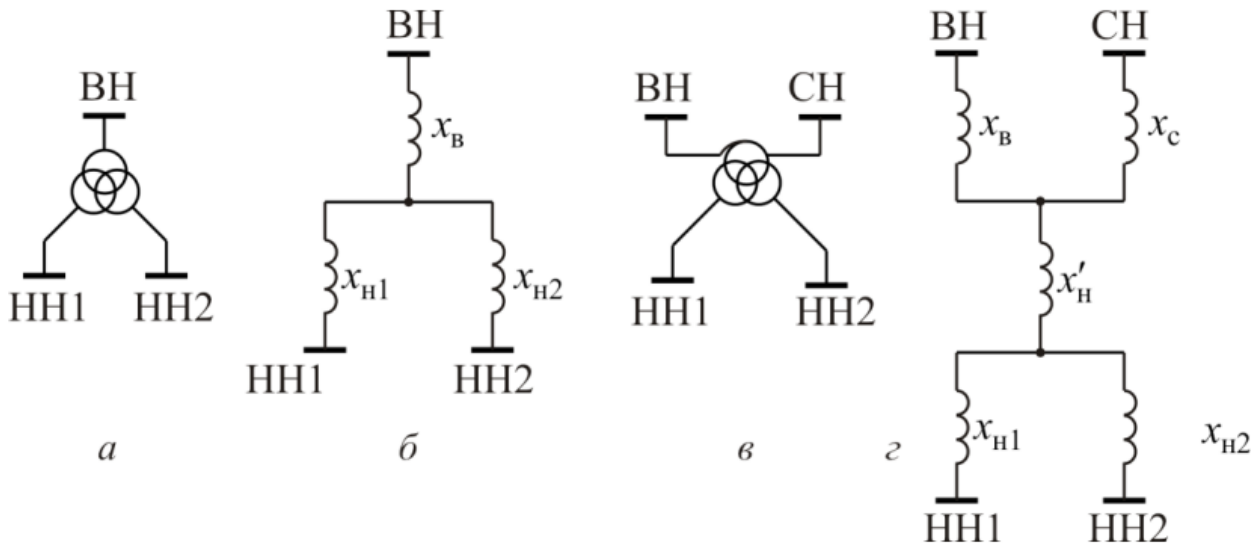
## Токоограничивающие устройства

---

**Трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения** применяются для снижения тока КЗ в сетях низкого напряжения. Повышающие трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения используются для формирования укрупненных блоков электростанций, особенно гидравлических (ГЭС), а понижающие применяются на подстанциях энергосистем и промышленных предприятий. Понижающие трансформаторы устанавливаются также в системе собственных нужд мощных тепловых и атомных электростанций.

## Токоограничивающие устройства

### Характерные схемы соединения трансформаторов



Типовые схемы трансформаторов и автотрансформаторов с расщепленной обмоткой НН:  
 а – принципиальная; б – схема замещения трансформатора; в и г – то же для автотрансформатора



## Токоограничивающие устройства

---

Характерными параметрами трансформатора с расщеплением обмотки НН на две являются:

- сопротивление расщепления ( $x_{\text{расщ}}$ ), равное сопротивлению между выводами НН1-НН2;
- сквозное сопротивление ( $x_{\text{скв}}$ ), равное сопротивлению между выводами ВН и объединенными выводами расщепленной обмотки НН1//НН2;
- коэффициент расщепления ( $k_{\text{расщ}}$ ), определяемый по выражению  $k_{\text{расщ}} = x_{\text{расщ}}/x_{\text{скв}}$ ;
- номинальная мощность ( $S_{\text{ном}}$ ), номинальные напряжения ( $U_{(В)\text{ном}}$ ,  $U_{(Н)\text{ном}}$ ) и напряжения короткого замыкания ( $U_{\text{К(В-Н)}}$ ,  $U_{\text{К(Н1-Н2)}}$ ).

Кроме выше упомянутых, известны и другие токоограничивающие устройства: резонансного, трансформаторного, реакторно-вентильного типов и др.



Величина токов при коротких замыканиях на землю существенно зависит от результирующего сопротивления схемы нулевой последовательности ( $x_{0\Sigma}$ ). Увеличение этого сопротивления приводит к уменьшению указанных токов. Практически величина  $x_{0\Sigma}$  определяется количеством и местом расположения трансформаторов и автотрансформаторов с заземленной нейтралью.

**Разземление нейтралей всех трансформаторов** позволяет получить максимальное значение  $x_{0\Sigma}$ , а токи КЗ на землю – наименьшими. Однако режим нейтрали трансформаторов определяет условия работы изоляции трансформаторов при коммутационных и атмосферных перенапряжениях, а также при возникновении в сети КЗ на землю. Поэтому возможность изменения режима заземления нейтралей ограничена рядом условий.



1. При КЗ на землю напряжение на неповрежденных фазах относительно земли возрастает. Степень увеличения напряжения характеризуется коэффициентом заземления сети  $K_3 = U_{\phi-3}/U_{\text{ном}}$ , где  $U_{\phi-3}$  – напряжение фазы относительно земли. Из экономических соображений трансформаторы напряжением 110 кВ и выше имеют ослабленную изоляцию нейтрали. Из этих соображений сети 110 кВ и выше должны быть *эффективно заземлены*, т. е. таким образом, чтобы напряжение на неповрежденных фазах при коротком замыкании на землю в любой точке не превышало 80 % линейного напряжения сети ( $1.4U_{\phi.\text{ном}}$ ). Это условие связано с установкой в сетях так называемых 80%-ных разрядников. Оно выполняется, т. е.  $K_3 = U_{\phi-3}/U_{\text{ном}} \leq 0.8$ , если удовлетворяется условие  $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma} \leq 4-5$ .





2. По условиям работы выключателей желательно, чтобы токи однофазного и двухфазного коротких замыканий на землю в любой точке сети не превышали тока трехфазного КЗ в этой же точке. Это требование выполняется, если результирующая реактивность схемы нулевой последовательности больше результирующей реактивности схемы прямой последовательности  $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma} \geq 1$ ).



Таким образом, при выборе режима заземления нейтралей силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше, необходимо выполнять следующие условия:

- $I_K^{(1)} / I_K^{(3)} \leq 1, \quad I_K^{(1.1)} / I_K^{(3)} \leq 1;$
- $K_3 = U_{\text{ф-з}} / U_{\text{ном}} \leq 0.8$ , где  $K_3$  – коэффициент заземления сети;
- $U_N \leq U_{N\text{доп}}$ ,

где  $U_{N\text{доп}}$  – допустимое напряжение на нейтрали трансформатора;

- $U_{N\text{имп}} \leq U_{N\text{имп. доп}}$ ,

где  $U_{N\text{имп. доп}}$  – импульсное допустимое напряжение на нейтрали трансформатора при КЗ в сети.



При выполнении перечисленных условий ограничить ток КЗ на землю можно наиболее просто путем **разземления нейтралей нескольких трансформаторов сети.**

Ограничения токов короткого замыкания можно добиться и **включением в нейтрали силовых трансформаторов реакторов или резисторов.** При одном и том же сопротивлении реакторы более существенно ограничивают ток короткого замыкания, чем резисторы. Однако реакторы утяжеляют условия работы изоляции нейтрали при атмосферных перенапряжениях. Резисторы, по сравнению с реакторами, обеспечивают большую скорость затухания апериодической составляющей тока КЗ.