



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



ИНЖЕНЕРНАЯ  
ШКОЛА  
ЭНЕРГЕТИКИ

# ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Лекция № 2

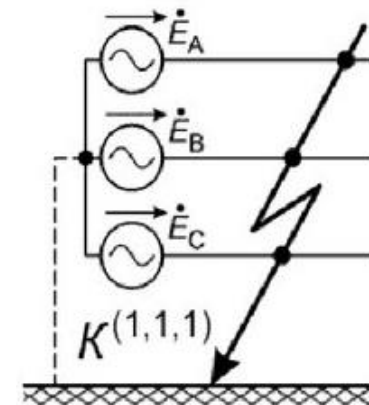
---

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

19.09.2023 г.

# ТРЕХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

**Трехфазное короткое замыкание** – короткое замыкание между тремя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.  
(ГОСТ Р 52735-2007)



*Междофазное КЗ*

*ВЛ 110 кВ*

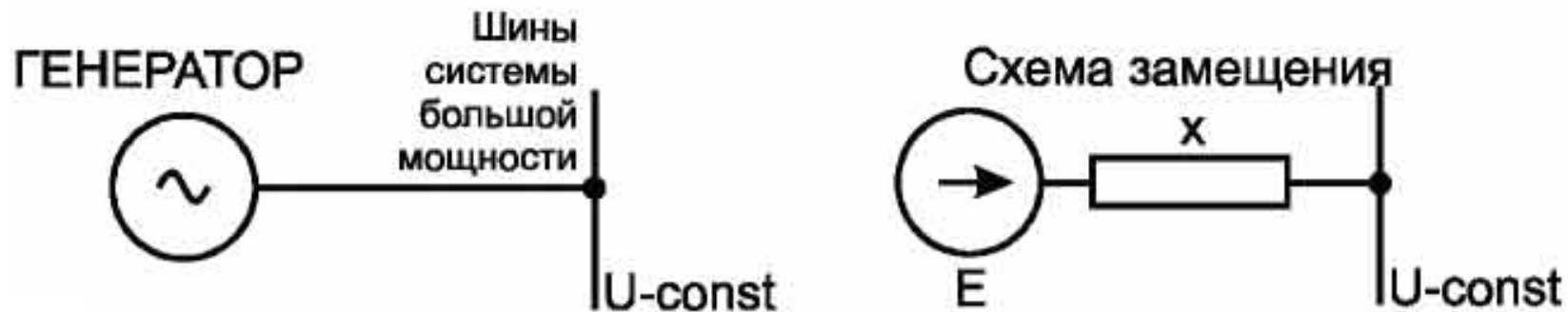


**K(3)**

## ТРЕХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

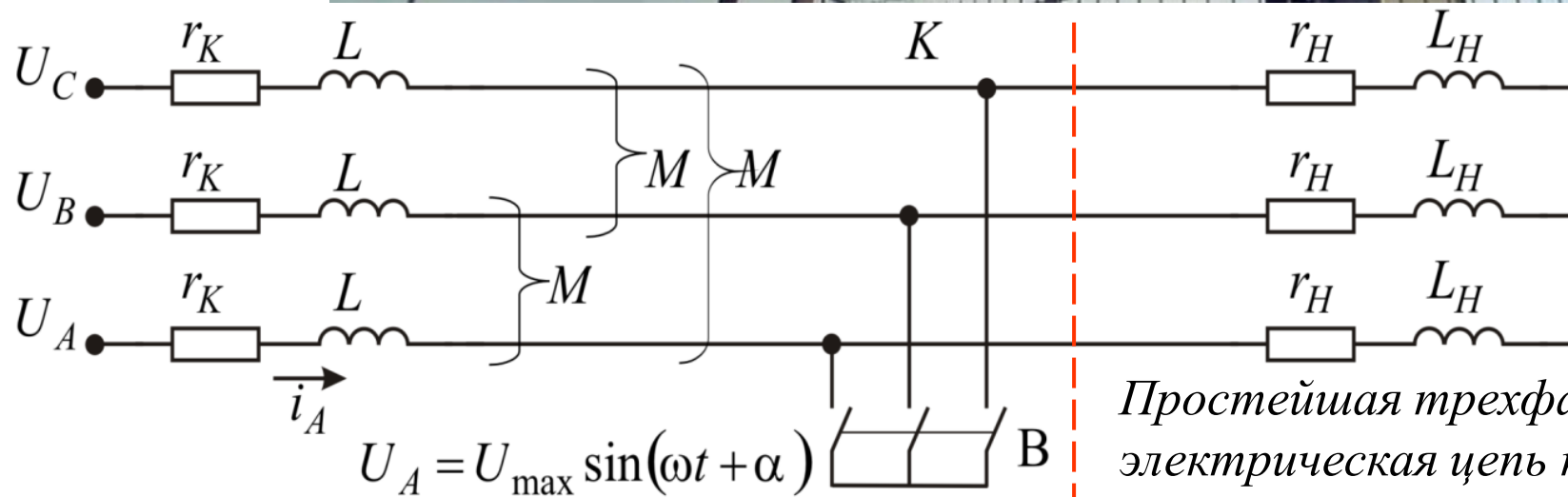
**Шинами неизменного напряжения** условно считают такой источник, напряжение на зажимах которого остается практически неизменным при любых изменениях тока в подключенной к нему цепи.

Отличительным признаком этого источника (**системы или шин бесконечной мощности**) является то, что его собственное сопротивление ничтожно по сравнению с сопротивлением цепи короткого замыкания

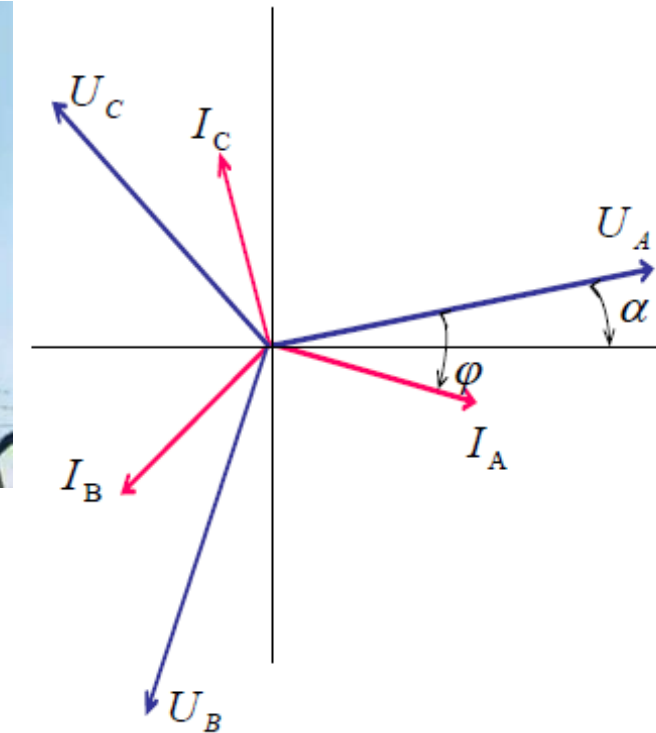


# ТРЕХФАЗНОЕ КЗ В ЦЕПИ, ПИТАЕМОЙ ШИНАМИ НЕИЗМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ (БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ)

Схема замещения простейшей цепи для расчета КЗ представляется в трехлинейном исполнении, и изначально рассматривается нагрузочный режим, предшествующий короткому замыканию.



Простейшая трехфазная электрическая цепь при КЗ



Векторная диаграмма нагрузочного режима, предшествующего КЗ

## ТРЕХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

---

Ток режима, предшествующего короткому замыканию, для фазы «А» равен

$$i_A = \frac{U_{A\max}}{Z_\Sigma} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) = I_{\text{Пmax}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

где  $Z_\Sigma = Z_K + Z_1$  – общее сопротивление цепи

Момент возникновения короткого замыкания фиксируется углом  $\alpha$ , называемым **углом включения КЗ**.

**Короткое замыкание** – всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек (фаз) между собой или с землей, при котором токи в ветвях, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима *ГОСТ Р 52735-2007*. После включения выключателя **В** цепь распадается на два независимых друг от друга участка.

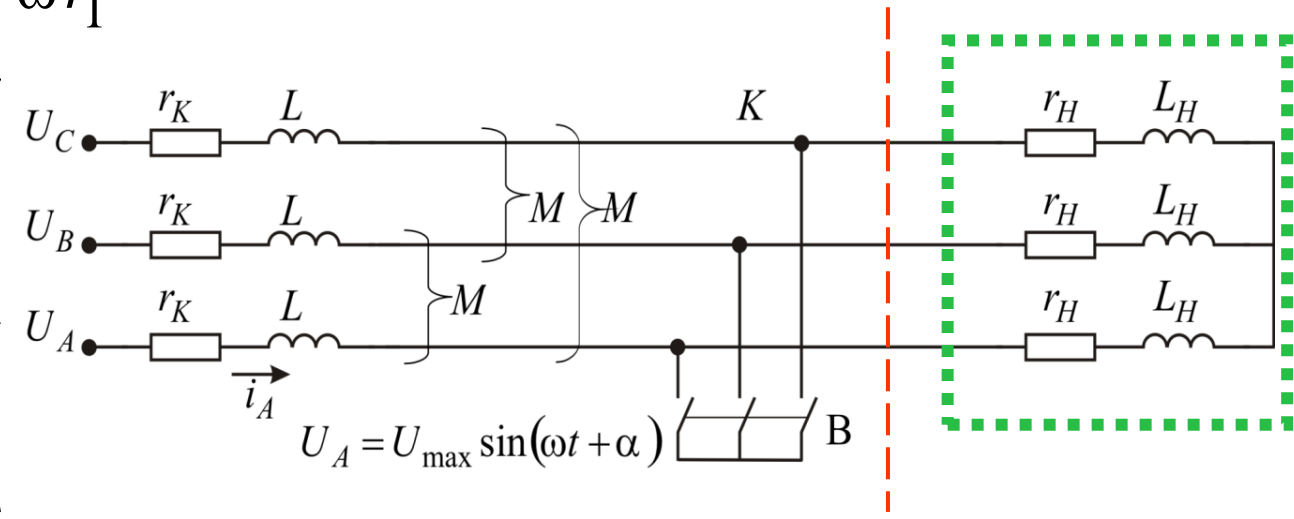
Правая часть схемы с  $R_1$  и  $L_1$  оказывается зашунтированной коротким замыканием. Ток в ней поддерживается до тех пор, пока запасенная индуктивностью энергия не перейдет в тепло в активном сопротивлении, т. е. в этой части имеется лишь свободный ток,

$$i_1 = i_{1(0)} e^{-t/T_{a1}}$$

затухающий по экспоненте с постоянной времени

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

Начальное значение свободного тока в каждой фазе зашунтированного участка цепи равно предшествующему мгновенному значению тока, поскольку в цепи с индуктивностью ток не может изменяться скачкообразно.



# СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Дифференциальное уравнение равновесия ЭДС для фазы «А» левой части схемы имеет вид

$$U_A = r_K i_A + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt}$$

Решение ДУ представляет закон изменения тока КЗ в переходном режиме

$$i_K = i_{\Pi} + i_a$$

Вынужденная периодическая составляющая тока (фаза А):

$$i_{\Pi} = \frac{U_{\max}}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) = I_{\Pi \max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K)$$

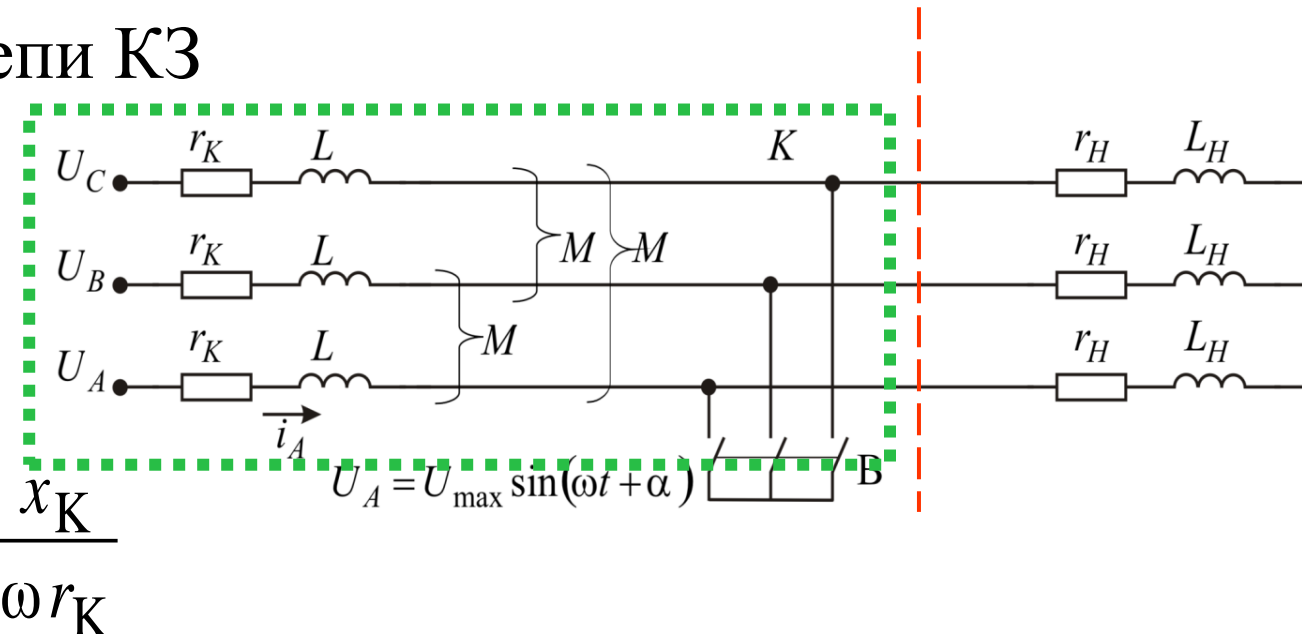
где  $Z_K = r_K + j\omega L_K$  – сопротивление цепи КЗ

Свободная аperiодическая составляющая тока

$$i_a = i_a(0) e^{-t/T_a}$$

Постоянная времени затухания

аperiодической слагаемой

$$T_a = \frac{L_K}{r_K} = \frac{x_K}{\omega r_K}$$


## **СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

---

**Периодическая составляющая тока короткого замыкания рабочей частоты в электроустановке** – составляющая тока короткого замыкания в электроустановке, изменяющаяся по периодическому закону с рабочей частотой.

**Апериодическая составляющая тока короткого замыкания в электроустановке** – свободная составляющая тока короткого замыкания в электроустановке, изменяющаяся во времени без перемены знака.

**Постоянная времени апериодической составляющей тока короткого замыкания в электроустановке** – электромагнитная постоянная времени, характеризующая скорость затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания.

*(ГОСТ Р 52735-2007)*



# ЗНАЧЕНИЕ ТОКА КЗ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ

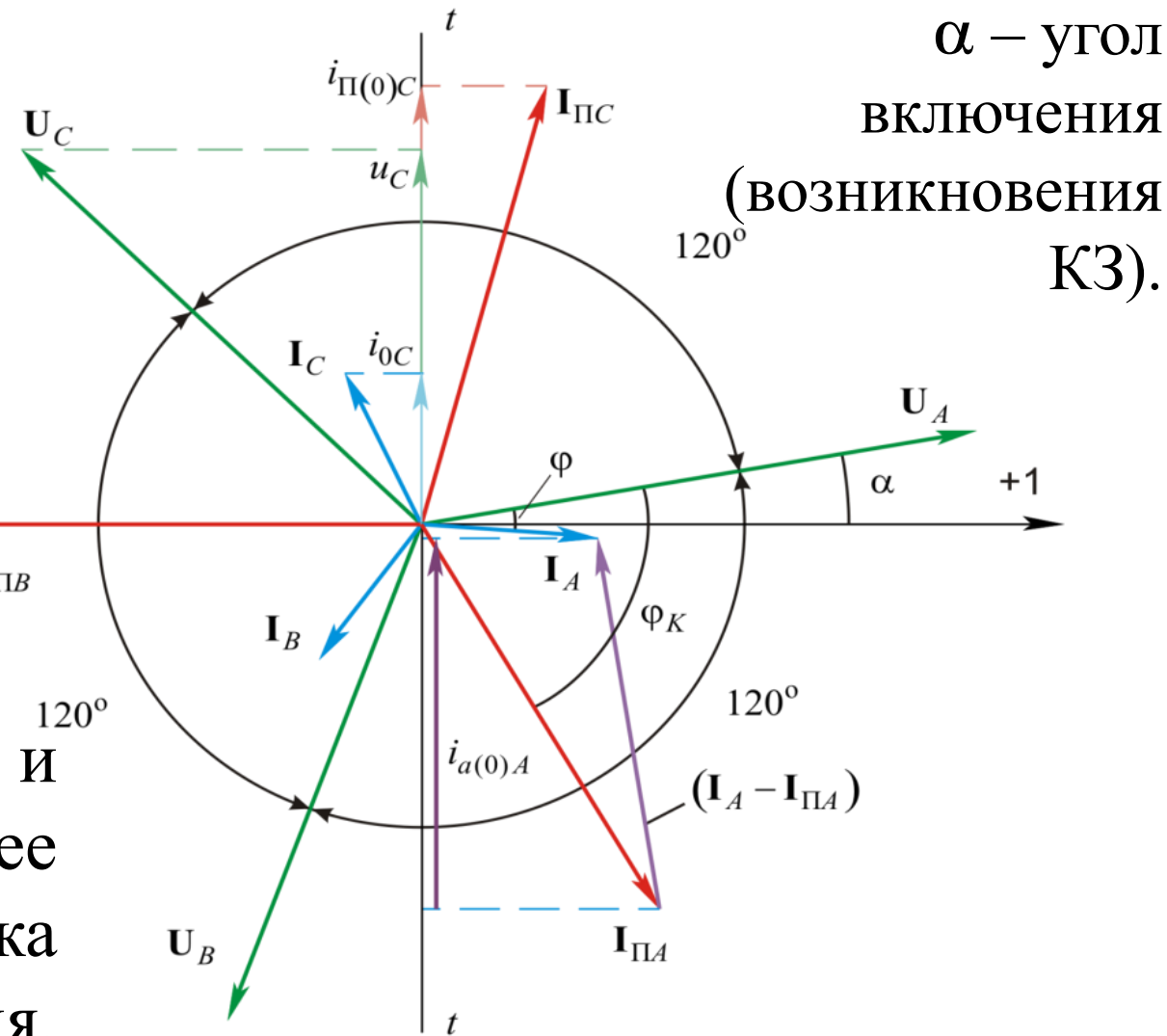
Начальное значение апериодической слагающей определяется из начальных условий:

$$i_0 = i_{\Pi(0)} + i_a(0)$$

откуда получаем

$$i_a(0) = I_{\max} \sin(\alpha - \varphi) - I_{\Pi \max} \sin(\alpha - \varphi_K)$$

Как следует из векторной диаграммы и расчетных выражений, наибольшее значение апериодической слагающей тока определяется не только фазой включения, но также предшествующим режимом.



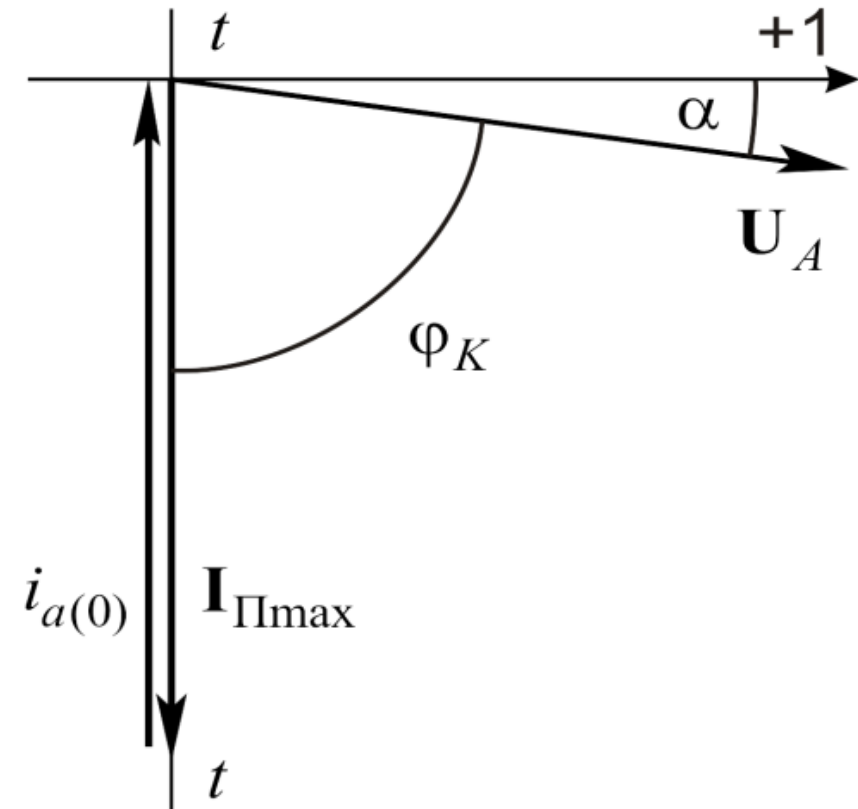
Векторная диаграмма для начального момента трехфазного КЗ

## ЗНАЧЕНИЕ ТОКА КЗ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ

При отсутствии предшествующего тока величина  $i_{a(0)}$  может достигать амплитуды периодической слагающей, если в момент короткого замыкания эта слагающая проходит через свой положительный или отрицательный максимум

Указанные условия представляют **наиболее тяжелые условия** возникновения КЗ, которые на практике принимают в качестве расчетных.

В практических расчетах максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания, которое называют **ударным током** короткого замыкания  $i_y$ , обычно находят при наибольшем значении апериодической слагающей, считая что он наступает приблизительно через полпериода, что при  $f = 50$  Гц составляет около 0,01 секунды с возникновения короткого замыкания.



## УДАРНЫЙ ТОК КЗ

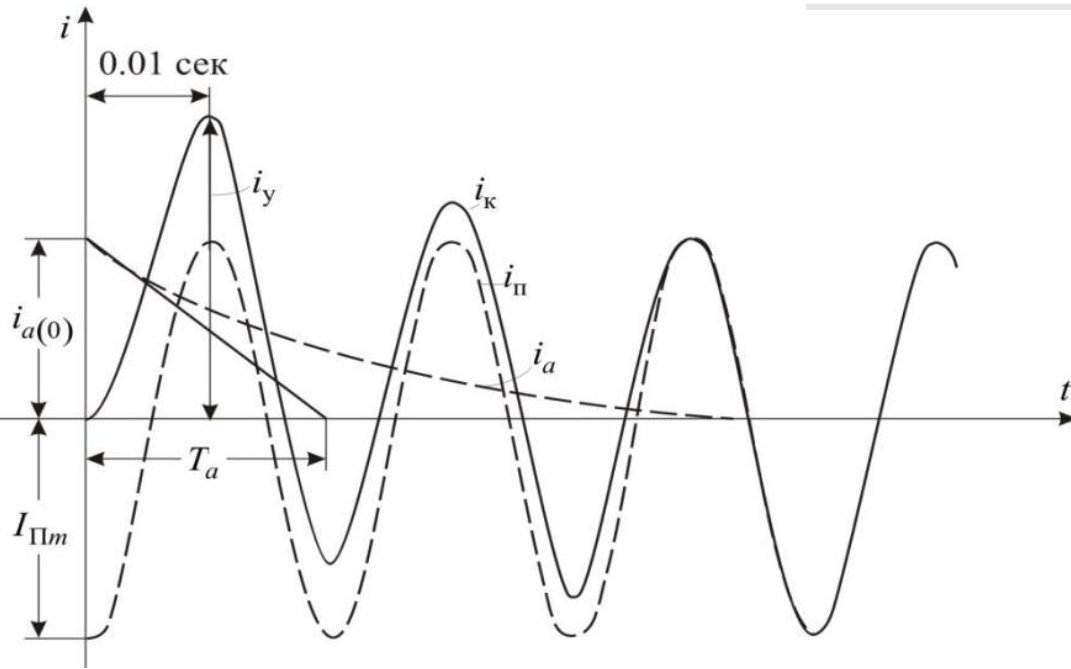
---

**Ударный ток короткого замыкания** – наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания в одной из фаз трехфазной электрической цепи, которое имеет место, когда короткое замыкание происходит в момент прохождения напряжения этой фазы через нулевое значение, а до возникновения короткого замыкания ток в цепи носит емкостной характер или отсутствует.

**Ударный коэффициент тока короткого замыкания (ударный коэффициент)** – отношение ударного тока короткого замыкания к амплитуде периодической составляющей тока короткого замыкания рабочей частоты в начальный момент времени.

*(ГОСТ Р 52735-2007)*

# УДАРНЫЙ ТОК КЗ



$i_k$  – ток КЗ;

$i_{\text{п}}$  – периодическая (вынужденная) составляющая тока КЗ;

$i_a$  – аperiodическая (свободная) составляющая тока КЗ;

$T_a$  – постоянная времени (затухания) аperiodической составляющей тока КЗ

$I_{\text{Пm}}$  ( $I_{\text{П0}}$ ) – максимальное расчетное значение (амплитуда) периодической сост. тока КЗ;

$I_{\text{п}}$  – действующее значение периодической сост. тока КЗ;

$i_{a(0)}$  – расчетное значение аperiodической составляющей тока КЗ в начальный момент времени;

$i_y$  – ударный ток КЗ (при наибольшем значении аperiodической слагающей, считая, что он наступает приблизительно через полпериода, что при  $f = 50$  Гц составляет 0,01 с)

## РАСЧЕТ УДАРНОГО ТОКА

Выражение для определения ударного тока КЗ можно записать в следующем виде:

$$i_{уд} = I_{Пmax} + I_{Пmax} e^{-0,01/T_a} = I_{Пmax} K_{уд} = \sqrt{2} I_{П} K_{уд},$$

где  $K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$  – ударный коэффициент, который показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагаемой.

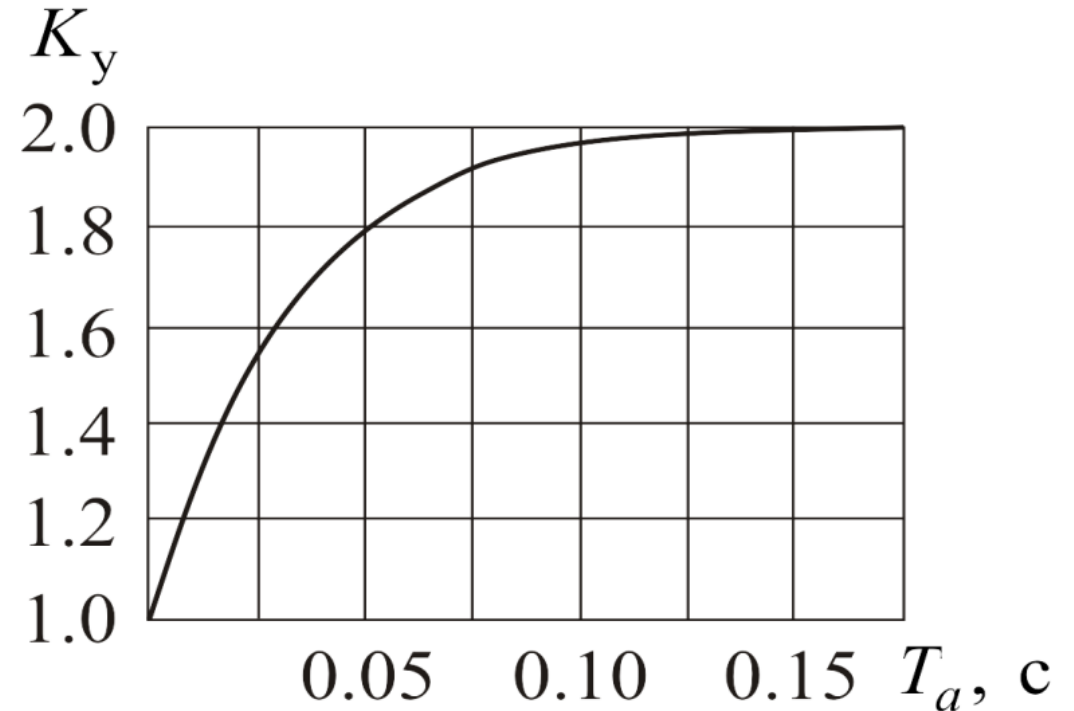
$I_{П}$  – действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент КЗ.

$1 < K_{уд} < 2$  – для активно-индуктивной сети.

Диапазон соответствует предельным

значениям  $T_a$

( $T_a = 0$  при  $L_k = 0$ ,  $T_a = \infty$  при  $R_k = 0$ ).



# РАСЧЕТ УДАРНОГО ТОКА

В практических расчетах часто пользуются стандартными  $T_a$  и  $K_{уд}$

Место КЗ и характеристика сети	$T_a, с$	$K_y$
1. Сборные шины 6...10 кВ станций с генераторами мощностью 30...60 МВт	0,127...0,254	1,92...1,96
2. За линейным реактором до 1000 А, присоединенным к сборным шинам по п. 1	0,0634...0,191	1,85...1,95
3. Сборные шины повышенного напряжения станций с трансформаторами мощностью 100 МВА и выше	0,0955...0,191	1,89...1,95
4. То же с трансформаторами 30...100 МВА	0,0634...0,159	1,85...1,94
5. Сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 100 МВА и выше	0,0634...0,127	1,85...1,92
6. То же с трансформаторами 30...100 МВА	0,048...0,0955	1,81...1,89
7. Распределительные сети 6...10 кВ	0,01	1,869
8. Ветви, защищаемые реактором с номинальным током 630 А и ниже	0,1	1,904
9. Турбогенераторы мощностью: 100...1000 МВт; 12...60 МВт	0,4...0,54 0,16...0,25	1,975...1,98 1,94...1,955
10. Блоки, состоящие из турбогенератора и повышающего трансформатора, при мощности генератора: 100...200 МВт; 300 МВт; 500 МВт; 800 МВт	0,26 0,32 0,35 0,30	1,965 1,977 1,983 1,967
11. Система, связанная с шинами, где рассматривается КЗ, воздушными линиями напряжением: 35 кВ; 110...150 кВ; 220...330 кВ; 500...750 кВ.	0,02 0,02...0,03 0,03...0,04 0,06...0,08	1,608 1,608...1,717 1,717...1,78 1,85...1,895

## РАСЧЕТ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА

**Действующим значением тока** в произвольный момент времени  $t$  называют среднеквадратичное значение за один период  $T$ , в середине которого находится рассматриваемый момент времени  $t$

$$I_{\text{П}t} = \sqrt{I_{\text{П}t}^2 + I_{\text{a}t}^2}$$

где  $I_{\text{П}t} = I_{\text{Пmax}(t)} / \sqrt{2}$  – действующее значение периодической слагающей для момента времени  $t$ ;

$I_{\text{a}t} = i_{\text{a}t}$  – действующее значение апериодической слагающей равно ее мгновенному значению для  $t$ .

**Наибольшее действующее значение полного тока КЗ:**

$$I_y = \sqrt{I_{\text{П}}^2 + I_{\text{a}}^2} = I_{\text{П}} \sqrt{1 + 2e^{-0,02/T_a}} = I_{\text{П}} \sqrt{1 + 2(K_{\text{уд}} - 1)^2}.$$

**Диапазон отношения**

$$1 < I_y / I_{\text{П}} < \sqrt{3}$$

**Мощность КЗ**

$$S_{\text{к}} = \sqrt{3} I_{\text{П}} U_{\text{ср}}$$

## РАСЧЕТ УДАРНОГО ТОКА

---

Способ расчета ударного тока КЗ в разветвленной сети определяется удаленностью точки КЗ от источников питания.

1. Если точка КЗ значительно удалена от источников, то расчетную схему преобразуют к простейшему виду и ударный ток рассчитывается следующим образом:

$$i_{уд} = I_{Пmax} + I_{Пmax} e^{-0,01/T_{аэк}} = \frac{E''_{ЭК} \sqrt{2}}{x_{\Sigma}} \left( 1 + e^{-0,01/T_{аэк}} \right)$$

где  $E''_{ЭК}$  – действующее значение эквивалентной ЭДС.

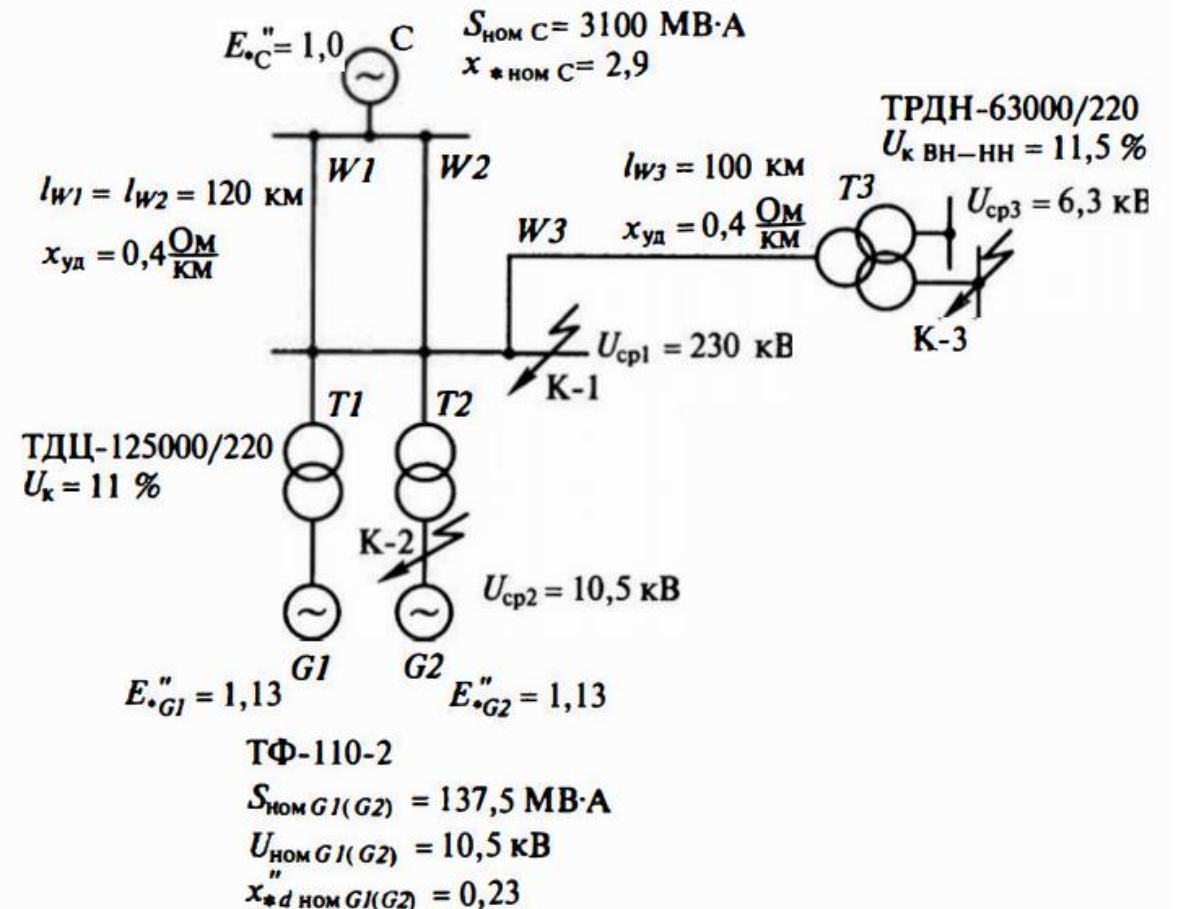


## РАСЧЕТ УДАРНОГО ТОКА

2. Если точка КЗ находится вблизи генераторов или крупных двигателей, то схему замещения преобразуют так, чтобы эти генераторы или двигатели были объединены в одну отдельную ветвь (с  $E_G''$  и  $x_G''$ ). Остальные источники объединяют в другую ветвь (с  $E_C''$  и  $x_C''$ ). Ударный ток короткого замыкания рассчитывается как сумма ударных токов от каждой ветви по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2} (K_{уГ} I_{Г} + K_{уС} I_{С}),$$

где  $I_{Г}$  и  $I_{С}$  – действующие значения периодической слагающей тока КЗ в каждой ветви



## ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ

---

Для учета индивидуальных особенностей источников питания в сложной схеме СЭС удобно воспользоваться **коэффициентами токораспределения**. Для схемы произвольной структуры считаем известными результирующий периодический ток  $I_{\Pi\Sigma}$  в месте КЗ и его распределение  $I_i$  по ветвям. Тогда коэффициент токораспределения  $C_i$  произвольной ветви  $i$  определится по выражению

$$C_i = \frac{I_i}{I_{\Pi\Sigma}}$$

При этом  $I_i$  и  $I_{\Pi\Sigma}$  могут быть выражены как в относительных, так и в именованных единицах, приведенные к единой ступени трансформации.

## ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ

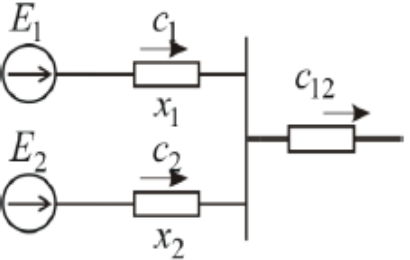
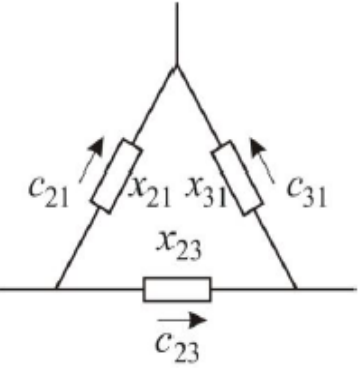
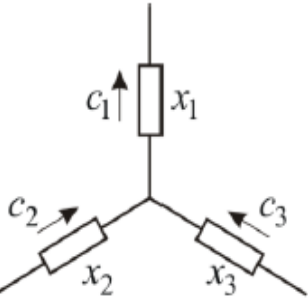
---

Следовательно, коэффициент токораспределения любой ветви численно равен току этой ветви в долях от тока  $I_{П\Sigma}$ , который выступает в качестве базиса. Коэффициенты  $C_{Gi}$  генерируемых источников характеризуют их доленое участие в питании места КЗ. Их сумма равна единице, т. е.

$$\sum C_{Gi} = C_0 = 1$$

Расчет коэффициентов распределения основан на общих законах электротехники. Схему с замкнутыми контурами рекомендуется предварительно упростить, приведя ее к сложно радиальному виду. Расчет коэффициентов токораспределения в такой схеме не представляет особых трудностей, поскольку предполагает использование формул токораспределения между параллельными ветвями (табл.).

# ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Схема	Расчетные формулы
	$C_1 = \frac{C_{12}x_2 + (E_1 - E_2)/I_{\text{ПС}}}{x_1 + x_2}$ $C_2 = \frac{C_{12}x_1 + (E_2 - E_1)/I_{\text{ПС}}}{x_1 + x_2}$
	$C_1, C_2, C_3 - \text{известны}$ $C_{21} = \frac{C_1x_1 + C_2x_2}{x_{21}}$ $C_{31} = \frac{C_1x_1 + C_3x_3}{x_{31}}$ $C_{23} = \frac{C_2x_2 - C_3x_3}{x_{23}}$
	$C_{21}, C_{31}, C_{23} - \text{известны}$ $C_1 = C_{21} + C_{31}$ $C_2 = C_{21} + C_{23}$ $C_3 = C_{31} - C_{23}$

*Основные формулы расчета коэффициентов токораспределения*

**Таким образом, используя коэффициенты распределения, можно по суммарному току в месте КЗ определить, как он распределится по ветвям.**

В действительности мощности энергосистем, отдельных источников и их сопротивления всегда имеют определенные конечные значения. Однако многие элементы электрических сетей обладают настолько большим сопротивлением по сравнению с сопротивлением энергосистемы, генератора, что при КЗ за такими элементами (трансформатор, реактор, линия) без особой погрешности в вычислении тока КЗ и остаточного напряжения сопротивление источника можно не учитывать.

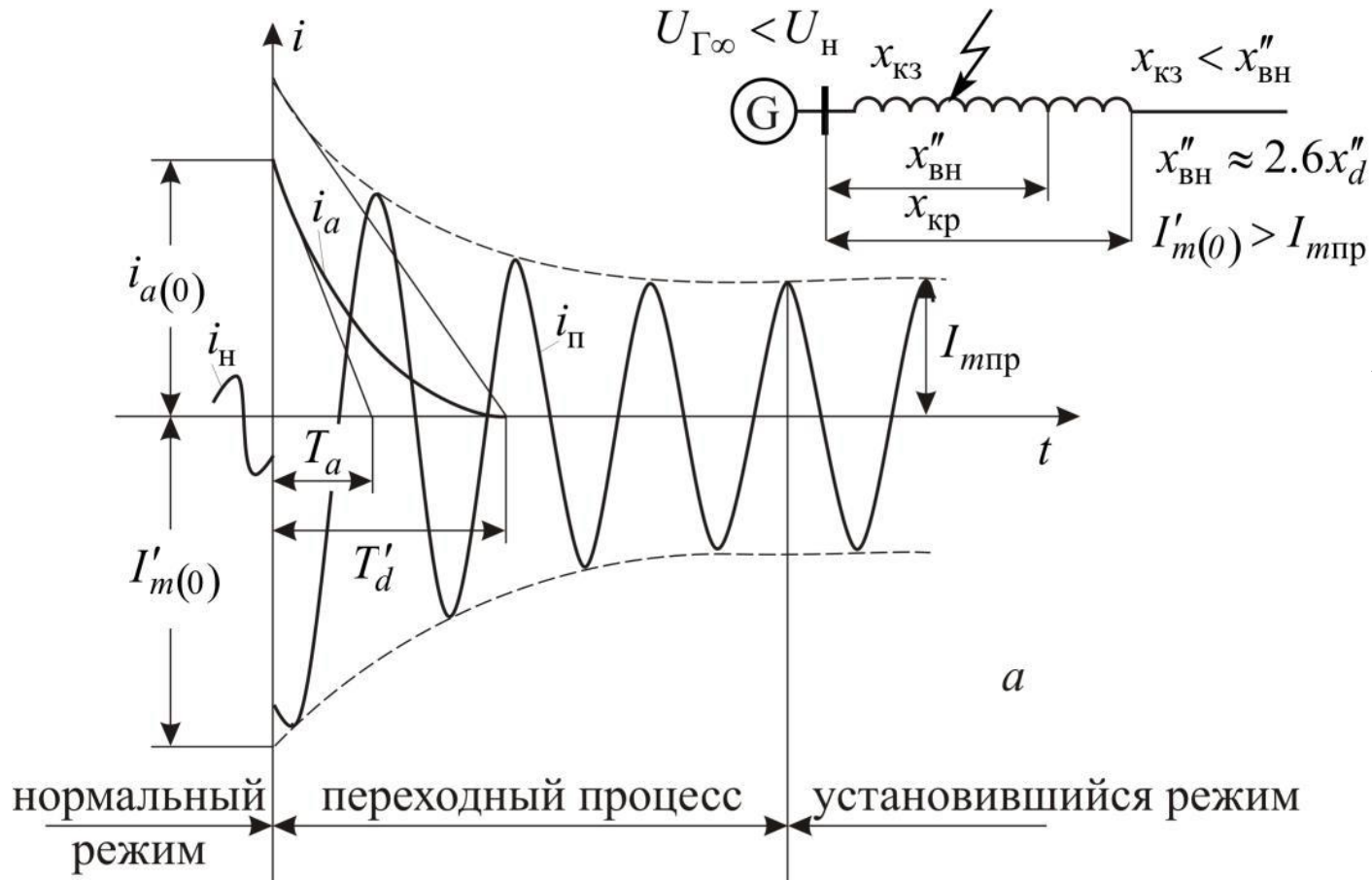


Обычно при вычислении токов КЗ для выбора электрооборудования и уставок релейной защиты можно не учитывать сопротивление питающей энергосистемы, если оно не превышает 5-10 % результирующего сопротивления цепи КЗ.

Отдельный случай – **расчет КЗ на выводах генераторов** или на таком удалении от них, что сопротивление цепи КЗ соизмеримо с сопротивлением генератора. В этом случае изменение параметров самого генератора при КЗ существенно влияет на ход процесса и им нельзя пренебречь.

## ТРЕХФАЗНОЕ КЗ НА ЗАЖИМАХ ГЕНЕРАТОРА (БЕЗ АРВ)

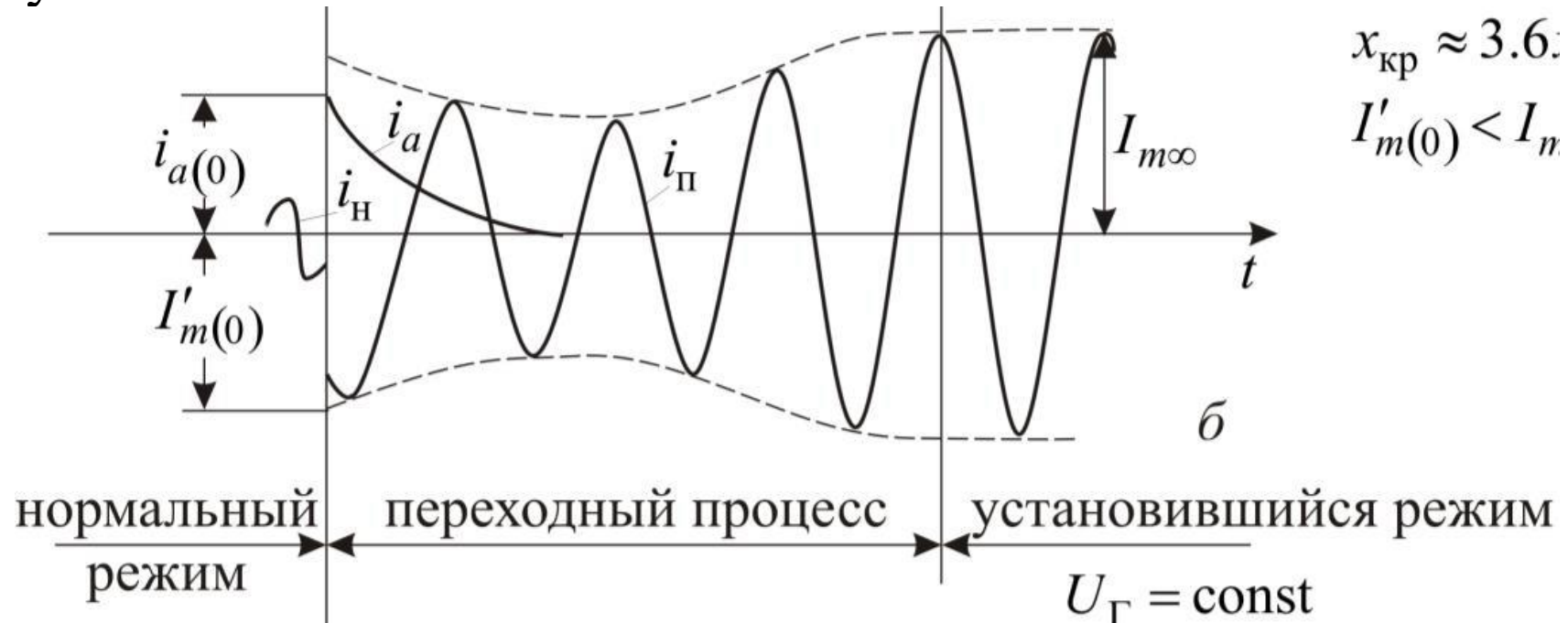
Поскольку генератор является источником конечной мощности и работает без АРВ, то по мере затухания свободных токов ротора увеличивается поток реакции статора и уменьшается ЭДС, наводимая в статоре, а, следовательно, и периодическая составляющая тока статора.



*Кривые изменения токов статора при трехфазном КЗ на зажимах генератора без автоматического регулятора возбуждения (АРВ).*

## ТРЕХФАЗНОЕ КЗ НА ЗАЖИМАХ ГЕНЕРАТОРА (С АРВ)

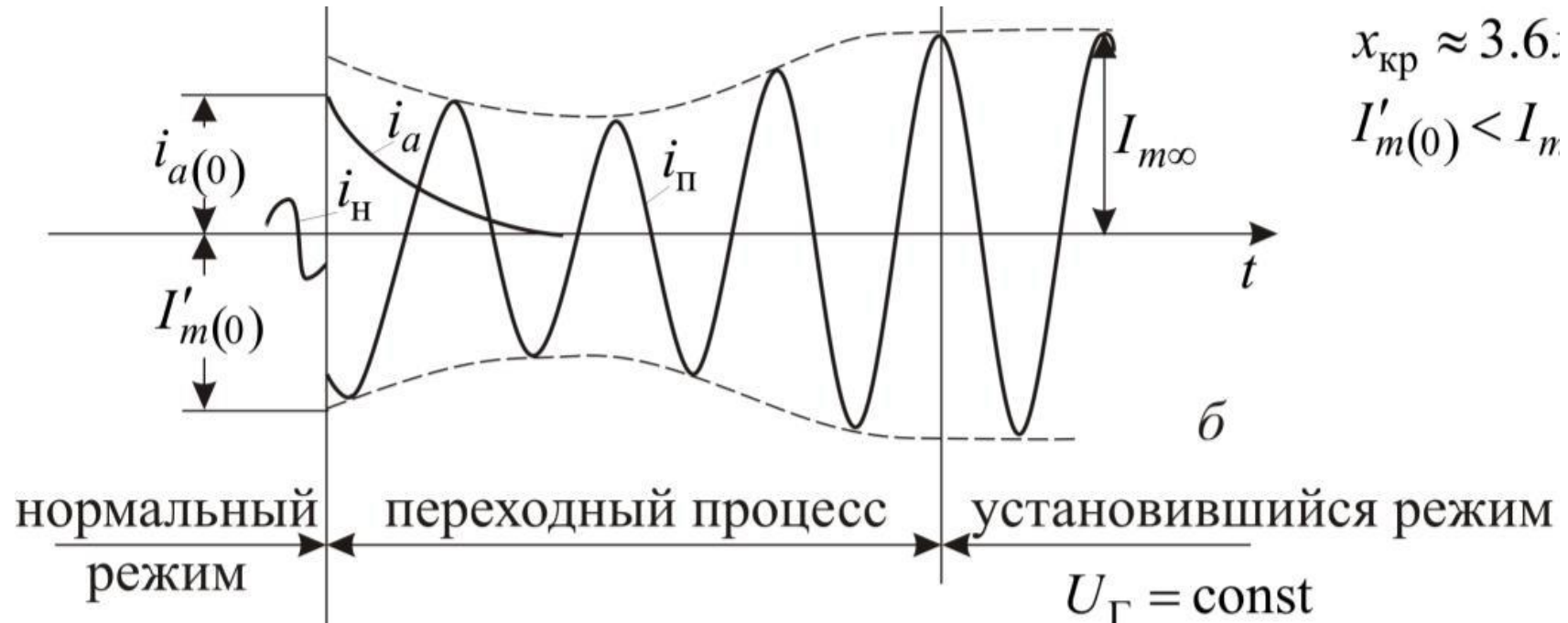
В начальный момент КЗ, в силу инерции магнитных потоков, влияния автоматического регулирования возбуждения на ток КЗ нет. В дальнейшем, спустя время, необходимое для срабатывания АРВ, под его действием начинается рост тока возбуждения и связанных с ним составляющих токов статора. Этот процесс протекает медленно, поэтому он приводит к изменению только ЭДС статора и вызванной ею периодической слагающей тока статора. Аперриодическая слагающая остается такой же, что и при отсутствии АРВ.



## ТРЕХФАЗНОЕ КЗ НА ЗАЖИМАХ ГЕНЕРАТОРА (С АРВ)

Как видно из кривых, изменение тока статора при трехфазном КЗ на зажимах генератора с АРВ можно разбить на три стадии.

На первой стадии (до начала действия АРВ) ток КЗ уменьшается так же, как и при его отсутствии. На второй – ток КЗ начинает увеличиваться до достижения установившегося значения. Третья стадия соответствует установившемуся режиму короткого замыкания.





## УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ КЗ

**Установившимся режимом переходного процесса** называется такой режим, при котором все возникшие в начальный момент КЗ свободные токи затухают и прекращается действие АРВ.

Регуляторы возбуждения, увеличивая ток возбуждения, вызывают рост напряжений во внешней цепи генератора. Степень такого увеличения зависит от удаленности места КЗ и параметров генераторов.

Для удаленных КЗ достаточно небольшого увеличения тока возбуждения, чтобы обеспечить номинальное напряжение на шинах генератора. По мере приближения точки КЗ к шинам генератора ток возбуждения должен быть все больше и больше, однако его рост ограничен потолком возбуждения  $I_{f \text{ пр}}$ .

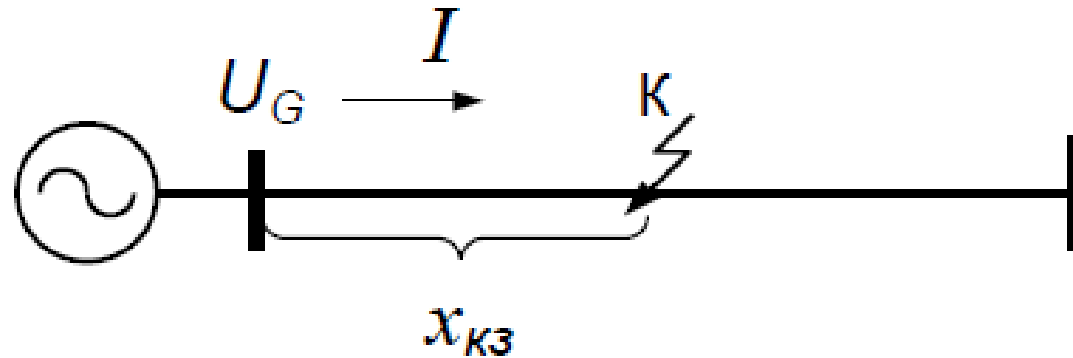
- для турбогенераторов –  $I_{*f \text{ пр}} = 4$ ,

- для гидрогенераторов –  $I_{*f \text{ пр}} = 3,2$ .

Следовательно, не при любой удаленности КЗ напряжение на шинах генератора может быть доведено до номинального значения.

## УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ КЗ

Наименьшая внешняя реактивность, после которой при КЗ в случае предельного возбуждения обеспечивается номинальное напряжение на выводах генератора, называется критической.



Ток КЗ генератора в этом случае называется критическим и определяется по формуле:

$$I_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{ном}}}{x_{\text{кр}}} = \frac{E_{q\text{ном}}}{x_d + x_{\text{кр}}}$$

Зная параметры генератора можно определить величину критической реактивности:

$$x_{\text{кр}} = x_d \frac{U_{\text{ном}}}{E_{q\text{ном}} - U_{\text{ном}}}$$

## УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ КЗ

---

Сравнивая фактическую удаленность короткого замыкания  $x_{кз}$  с  $x_{кр}$ , можно охарактеризовать режим работы генератора в установившемся режиме КЗ. При малой удаленности КЗ, когда справедливо условие  $x_{кз} < x_{кр}$ , генератор работает в режиме **предельного возбуждения**. В этих условиях его синхронная ЭДС достигает предельного значения, соответствующая предельному току возбуждения ( $E_q = E_{q \text{ пр}}$ ), а напряжение на выводах генератора не достигает номинального значения  $U_G < U_{\text{ном}}$ .

## УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ КЗ

---

При условии  $x_{кз} > x_{кр}$  генератор работает в режиме **номинального напряжения**, т. е.  $U_G = U_{ном}$ . При этом ток возбуждения меньше своего предельного значения  $I_f < I_{f пр}$ .

В частном случае, когда  $x_{кз} = x_{кр}$ , оба ранее рассмотренных режима существуют одновременно и характеризуются тем, что:

$$I_f = I_{f пр}, E_q = E_{q пр}, U_G = U_{ном}.$$

## ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ 3Ф КЗ

При аналитическом расчете токов КЗ схему замещения следует путем преобразований привести к простейшему виду и определить результирующую эквивалентную ЭДС  $E''_{\text{ЭК}}$  (или  $E''_{*\text{ЭК}(\text{б})}$ ) и результирующее эквивалентное сопротивление  $Z_{\Sigma}$  (или  $Z_{*\Sigma(\text{б})}$ ) относительно расчетной точки КЗ.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ составляет

$$I''_{\text{П}(0)} = \frac{E''_{\text{ЭК}}}{\sqrt{3}Z_{\Sigma}} = \frac{E''_{*\text{ЭК}(\text{б})}}{Z_{*\Sigma(\text{б})}} I_{\text{б}}$$

где  $I_{\text{б}}$  – базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится расчетная точка КЗ

## ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ 3Ф КЗ

---

**Апериодическая** составляющая тока КЗ для произвольного момента времени  $t$  рассчитывается по одному из следующих выражений

– по эквивалентной постоянной времени  $T_a$  для всей схемы:

$$i_{at} = \sqrt{2} I_{(0)}'' e^{-t/T_a}$$

– при наличии нескольких независимых друг от друга частей (многолучевой схемы) относительно точки КЗ:

$$i_{at} = \sqrt{2} \sum I_{(0)i}'' e^{-t/T_{ai}}$$

где  $T_{ai}$  – постоянные времени затухания апериодических составляющих  $i$ -й части схемы.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ 3Ф КЗ

---

Ударный ток КЗ, рассчитываемый по общему ударному коэффициенту, определяется выражением:

$$i_y = \sqrt{2} I_{(0)}'' K_y,$$

или с учетом индивидуальных ударных коэффициентов для выделенных источников питания:

$$i_y = \sqrt{2} \sum I_{(0)i}'' K_{yi}$$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ НАЗНАЧЕНИЕ РАСЧЕТА КЗ

Протекание токов КЗ приводит к увеличению потерь электроэнергии в проводниках и контактах, что вызывает их повышенный нагрев. Нагрев может ускорить старение и разрушение изоляции, вызвать сваривание и выгорание контактов, потерю механической прочности шин и проводов и т.п.



Проводники и аппараты должны без повреждений переносить в течение заданного расчетного времени нагрев токами КЗ, т.е. должны обладать **термической стойкостью**.



## ПРАКТИЧЕСКОЕ НАЗНАЧЕНИЕ РАСЧЕТА КЗ

Критерием термической стойкости проводника является допустимая температура его нагрева токами КЗ. Поэтому проводник или аппарат следует считать термически стойким, если его температура в процессе КЗ не превышает допустимых величин.

Для упрощения анализа термической стойкости часто используется понятие **минимального сечения проводника**  $q_{min}$  – минимальное сечение проводника, отвечающее термической стойкости при коротком замыкании, т.е. такое сечение которое при заданном токе КЗ обуславливает нагрев проводника до кратковременно допустимой температуры.

$$q_{min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C},$$

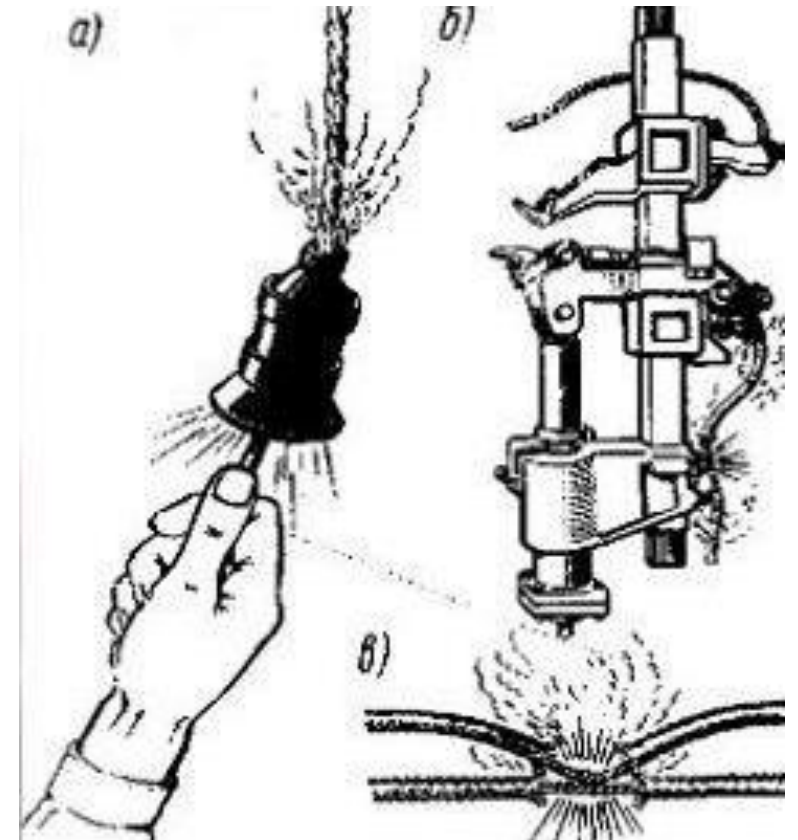
где  $B_k$  – импульс квадратичного тока КЗ (интеграл Джоуля), в качестве которого чаще используют **периодическую составляющую тока КЗ**,  $C$  – значение термического коэффициента.

**Условие термической стойкости:  $q \gg q_{min}$**

## ПРАКТИЧЕСКОЕ НАЗНАЧЕНИЕ РАСЧЕТА КЗ

Протекание токов КЗ сопровождается также значительными электродинамическими усилиями между проводниками. Если не принять должных мер, под действием этих усилий токоведущие части и их изоляция могут быть разрушены.

Токоведущие части, аппараты и электрические машины должны быть сконструированы так, чтобы выдерживать без повреждений усилия возникающие при КЗ, т.е. должны обладать **электродинамической стойкостью**.



## ПРАКТИЧЕСКОЕ НАЗНАЧЕНИЕ РАСЧЕТА КЗ

---

Сила взаимодействия токов определяется по формулам, вытекающим из закона Био-Савара. При этом, поскольку сила, действующая на проводник с током, определяется как результат его взаимодействия с токами в проводниках двух других фаз, при этом в наиболее тяжелых условиях оказывается проводник средней фазы.

Для определения предельного усилия при трехфазном КЗ в системе горизонтально расположенных проводников пользуются выражением

$$f^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot k_{\phi} \frac{i_y^2}{a},$$

где  $i_y$  – ударный ток трехфазного КЗ.

**Под электродинамической стойкостью понимают способность аппаратов или проводников выдерживать механические усилия, возникающие при протекании токов КЗ, без деформаций, препятствующих их дальнейшей нормальной работе.**

## ПРАКТИЧЕСКОЕ НАЗНАЧЕНИЕ РАСЧЕТА КЗ

Для электрических аппаратов завод-изготовитель указывает гарантийный ток КЗ, при котором обеспечивается электродинамическая стойкость. Чаще всего в каталогах на оборудование задается мгновенное значение тока электродинамической стойкости  $i_{\text{дин}}$  (или  $i_{\text{max}}$ , или  $i_{\text{пр,скв}}$ ).

При выборе аппаратов гарантированный заводом-изготовителем ток сравнивается с расчетным ударным током КЗ. Должно быть выполнено условие

$$i_{\text{дин}} \geq i_{\text{у}}^{(3)},$$

где  $i_{\text{у}}$  – ударный ток трехфазного КЗ.

Электродинамическая стойкость жестких шин, за исключением комплектных шинопроводов и шин КРУ, определяется расчетом механических напряжений в материале проводника при КЗ. Критерием стойкости служит выполнение условия

$$\sigma_{\text{доп}} \geq \sigma_{\text{расч}}.$$