

# Переходные процессы в электроэнергетических системах

Основные положения. Установившийся режим, Переходный режим. Виды коротких замыканий (КЗ). Особенности практических расчетов. Трехфазное КЗ в неразветвленной цепи. Трехфазное КЗ за трансформатором. Трехфазное КЗ на выводах синхронной машины. Начальный момент времени, периодическая и аperiodическая составляющие тока КЗ. Виды расчетов КЗ. Расчет начальной периодической составляющей тока трехфазного КЗ и аperiodической составляющей в сетях выше 1000 В.

лектор

Беспалов Александр Владимирович

## Режим работы электрооборудования

совокупность условий работы электрооборудования за определенный интервал времени с учетом их длительности, последовательности, а также значения и характера нагрузки.

### Установившийся режим работы электрооборудования

режим работы электрооборудования, при котором значения всех параметров режима практически неизменны или изменяются периодически

*аварийные установившиеся*

*нормальные установившиеся*

*послеаварийные установившиеся, которые наступают после отключения поврежденных элементов СЭС, обусловленного необходимостью ликвидации аварии. В этих режимах на некоторое время допустимы отклонения от нормальных значений параметров*

### Переходный режим работы электрооборудования

режим перехода от одного установившегося режима работы электрооборудования к другому

*нормальные переходные*

*аварийные переходные*

## Переходный режим работы электрооборудования

Электромеханический переходный процесс в электроустановке

Электромагнитный переходный процесс в электроустановке - переходный процесс, характеризуемый изменением значений только электромагнитных величин электроустановки.

При наличии вращающихся электрических машин возможно только в течении ограниченного промежутка времени

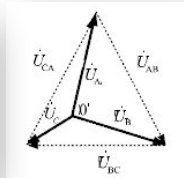
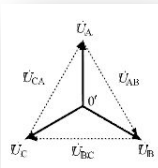
- ❖ Короткие замыкания.
- ❖ Включение и отключение нагрузки
- ❖ Пуск электродвигателей.
- ❖ Несимметричные режимы работы
- ❖ Процессы, связанные с изменением тока возбуждения синхронных машин.
- ❖ Атмосферно-климатические воздействия на элементы электрической системы.
- ❖ Включение длинных линий на холостом ходу.



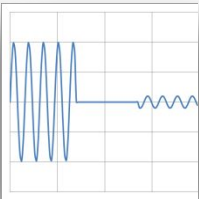
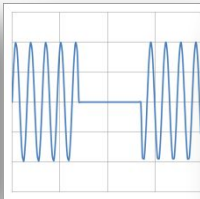
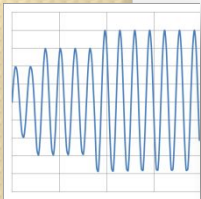
## Цель расчета переходных процессов

- Выбор и проверка оборудования
- Проектирования и настройки средств релейной защиты и автоматики;
- Сопоставление, оценка и выбор схем электрических соединений;
- Оценка устойчивости работы системы и узлов нагрузки;
- Проектирование заземляющих устройств;
- Определение влияния токов КЗ на линии связи;
- Анализа аварий;
- Определение условий электроснабжения потребителей в аварийных ситуациях.

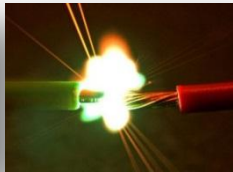
**Короткое замыкание в электроустановке** – замыкание, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.



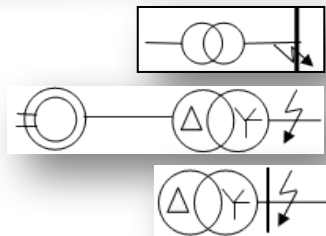
- Симметричное короткое замыкание.
- Несимметричное короткое замыкание



- Видоизменяющееся короткое замыкание
- Устойчивое короткое замыкание
- Неустойчивое короткое замыкание



- Металлическое замыкание
- Дуговое замыкание



- Удаленное короткое замыкание
- Близкое короткое замыкание
- Неудаленное короткое замыкание

**Симметричное короткое замыкание** – короткое замыкание в электроустановке, при котором все ее фазы находятся в одинаковых условиях.

**Несимметричное короткое замыкание** – короткое замыкание в электроустановке, при котором одна из ее фаз находится в условиях, отличных от условий других фаз.

**Металлическое замыкание** (не допустимо: глухое замыкание) - замыкание, при котором сопротивление в месте его возникновения, т.е. переходное сопротивление, очень мало и им можно пренебречь.

**Дуговое замыкание** - замыкание, при котором в месте его возникновения образуется электрическая дуга.

**Видоизменяющееся короткое замыкание** – короткое замыкание в электроустановке с переходом одного вида короткого замыкания в другой.

**Устойчивое короткое замыкание** – короткое замыкание в электроустановке, условия возникновения которого сохраняются во время бестоковой паузы коммутационного электрического аппарата.

**Неустойчивое короткое замыкание** – короткое замыкание в электроустановке, условия возникновения которого самоликвидируются во время бестоковой паузы коммутационного электрического аппарата.

**Удаленное короткое замыкание** – короткое замыкание в электроустановке, при котором амплитуды периодической составляющей тока данного источника энергии в начальный и в произвольный моменты времени практически одинаковы.

**Близкое короткое замыкание** – короткое замыкание в электроустановке, при котором амплитуды периодической составляющей тока данного источника энергии в начальный и в произвольный моменты времени существенно отличаются.

**Неудаленное короткое замыкание** – близкое короткое замыкание на присоединенной к выключателю воздушной электрической линии, находящееся от него на расстоянии от нескольких сотен метров до нескольких километров, при котором условия отключения существенно утяжеляются.

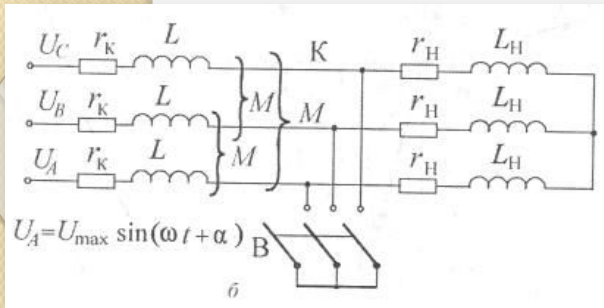
	Теоретические расчеты	Практические расчеты
Цель расчета	Определение значений физических величин	Конкретная цель, для которой необходима оценка предельных значений режима работы
Исходные данные	Параметры схемы замещения, геометрические параметры модели и т.п.	Расчетная точка на реальном или проектируемом объекте, параметры которого точно не известны
Сложность методов расчета	Не ограничена	Простые формулы, универсальные и нормируемые
Критерий качества	Точность	Соответствие установленному порядку расчета

Особенности расчетов реальных систем:

- Отсутствие достоверной информации о схемах и параметрах системы
- Отсутствие достоверной информации о режиме работы системы до переходного процесса
- Необходимость обеспечить надежность определения граничных значений параметров режима работы системы при переходном процессе



# Трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи



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

$$Z_\Sigma = Z_K + Z_{HT}$$

$\varphi$  - Фаза возникновения короткого замыкания в электроустановке

Режим до  
возникновения к.з.

$$U_A = i_A R_k + L_k \frac{di_A}{dt}$$

Уравнение режима работы участка с источником электроэнергии

$$i = i_{\Pi} + i_a = \frac{U_{\max}}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a(0)} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

Апериодическая составляющая

Периодическая составляющая

Мгновенное значение тока к.з.

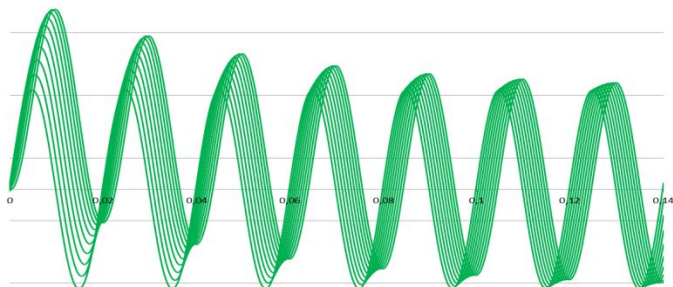
$$T_a = \frac{L_K}{R_K}$$

$$\varphi_K = \arctg\left(\frac{X_K}{R_K}\right), Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$$

$$i_{a(0)} = I_{0\max} \sin(\alpha - \varphi_0) - I_{\Pi\max} \sin(\alpha - \varphi_k)$$

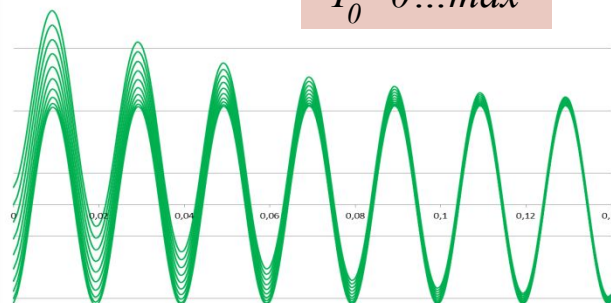


$$\alpha = 0 \dots \pi/2$$

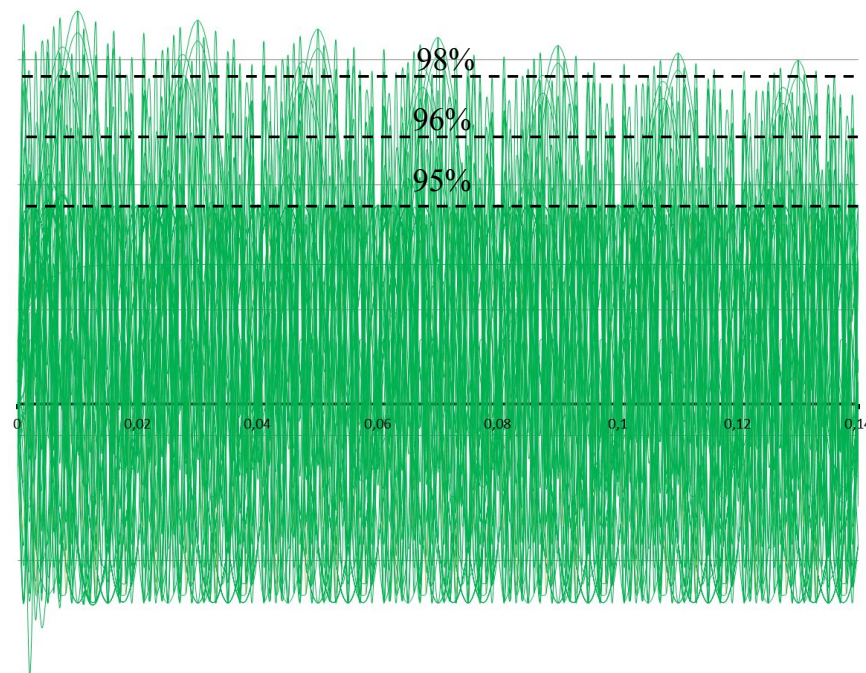
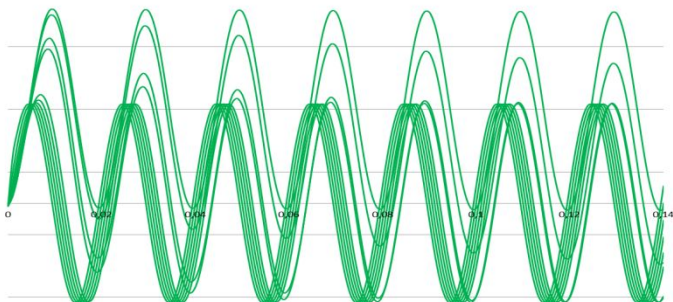


$$\phi_0 = 0 \dots \pi/2$$

$$I_0 = 0 \dots \max$$



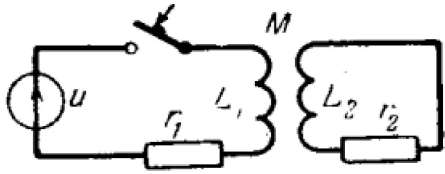
$$\phi_k = 0 \dots \pi/2$$



**Любой** переходный процесс в реальной электроэнергетической системе является **случайным** процессом

Полный спектр изменения всех параметров

# Трёхфазное короткое замыкание на выводах трансформатора



$$\begin{cases} u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ 0 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{cases}$$

$$i_1(t) = i_{\text{ст}} + i'_{a1} + i''_{a1} = \frac{U_m}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - \frac{U_m(T_{10} - T'')}{Z_K(T' - T'')} e^{-t/T'} - \frac{U_m(T_{20} - T'')}{Z_K(T' - T'')} e^{-t/T''}$$

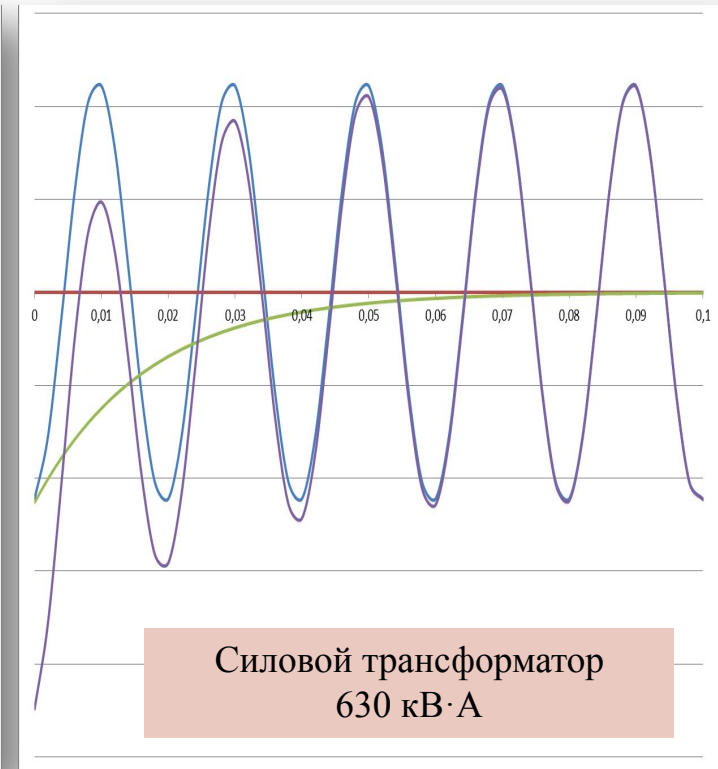
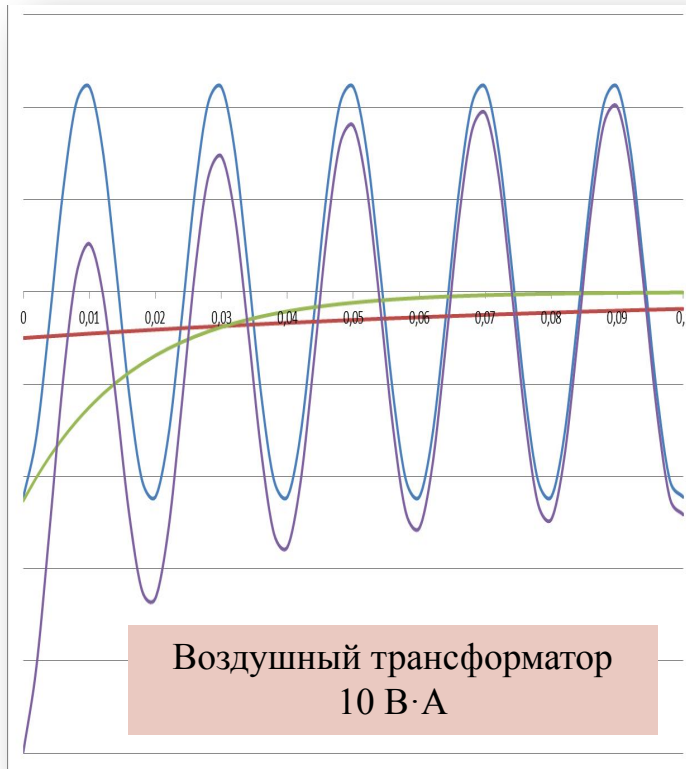
$$i_2(t) = i_{\text{ст}2} + i'_{a2} + i''_{a2} = \frac{M \cdot U_m}{L_1 L_2 Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - \frac{M \cdot U_m}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{(T' - T'')} (e^{-t/T'} - e^{-t/T''})$$

$$T_{10} = \frac{L_1}{R_1} \quad T_{20} = \frac{L_2}{R_2}$$

$$T' = \frac{1+q}{2} (T_{10} + T_{20})$$

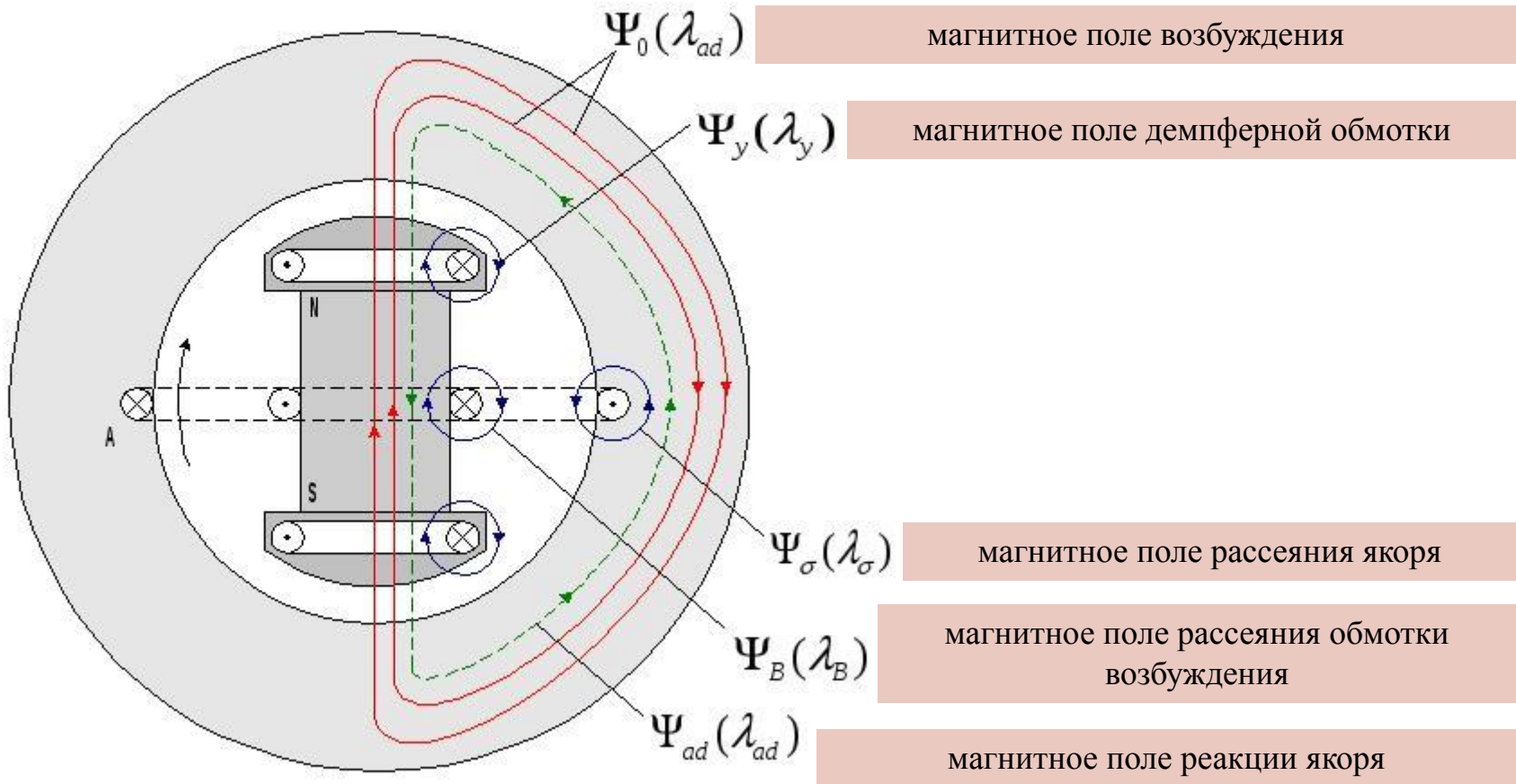
$$T'' = \frac{1-q}{2} (T_{10} + T_{20})$$

$$q = \sqrt{1 - \frac{4 \left(1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}\right) T_{10} T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2}}$$



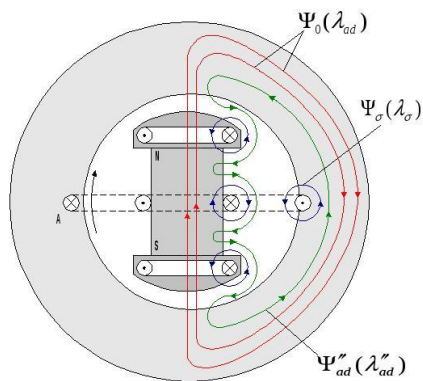
# Трёхфазное короткое замыкание на выводах синхронного генератора

## Магнитные поля и обмотки



# Трёхфазное короткое замыкание на выводах синхронного генератора

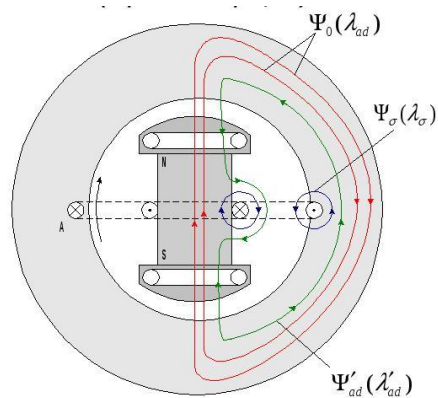
поля в начальный момент переходного процесса



Сверхпереходные  
величины

$$E_d'' \quad E_q'' \quad X_d'' \quad X_q''$$

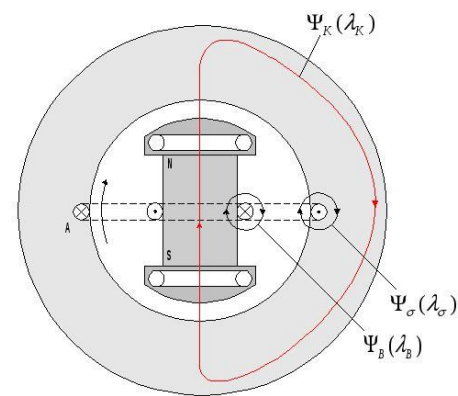
поля в последующий момент переходного процесса



Переходные  
величины

$$E_q' \quad X_d'$$

поля в установившемся режиме

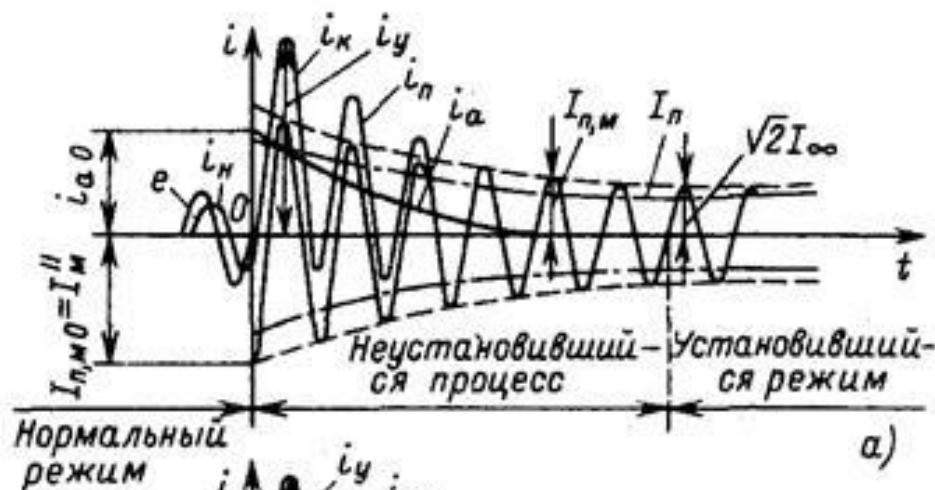


Синхронные  
(установившиеся)  
величины

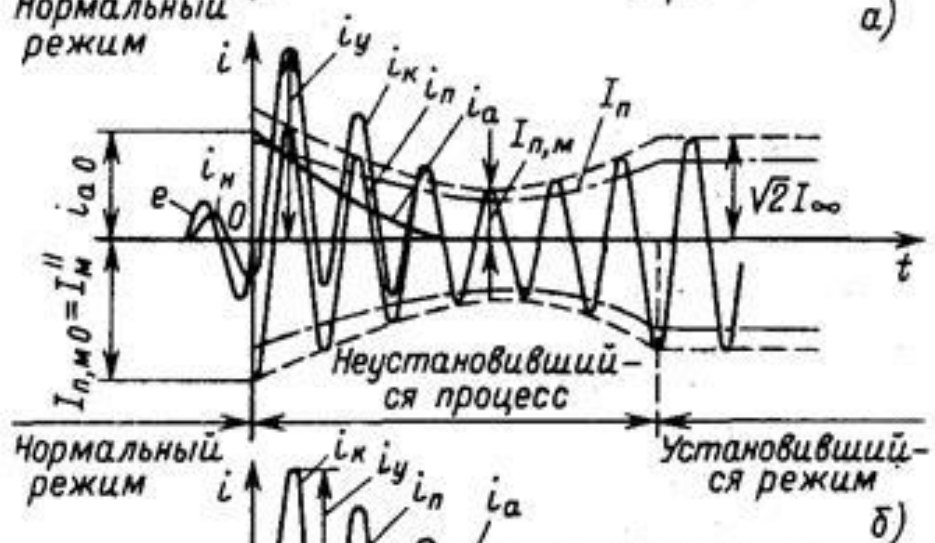
$$E_q \quad X_d \quad X_q$$

Обозначения величин, принятые в литературе по переходным процессам





а) при питании от генераторов без АРВ;



б) при питании от генераторов с АРВ;



в) при питании от энергосистемы.

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

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

**Мгновенное значение** тока короткого замыкания в электроустановке

**Периодическая составляющая** тока короткого замыкания в электроустановке

**Апериодическая составляющая** тока короткого замыкания в электроустановке

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

**Действующее значение периодической составляющей**  
тока короткого замыкания рабочей частоты в электроустановке

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

**Постоянная времени апериодической составляющей**  
тока короткого замыкания рабочей частоты в электроустановке

## Простые стандартные расчеты

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


## Сложные стандартные расчеты

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

## Нестандартные расчеты

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



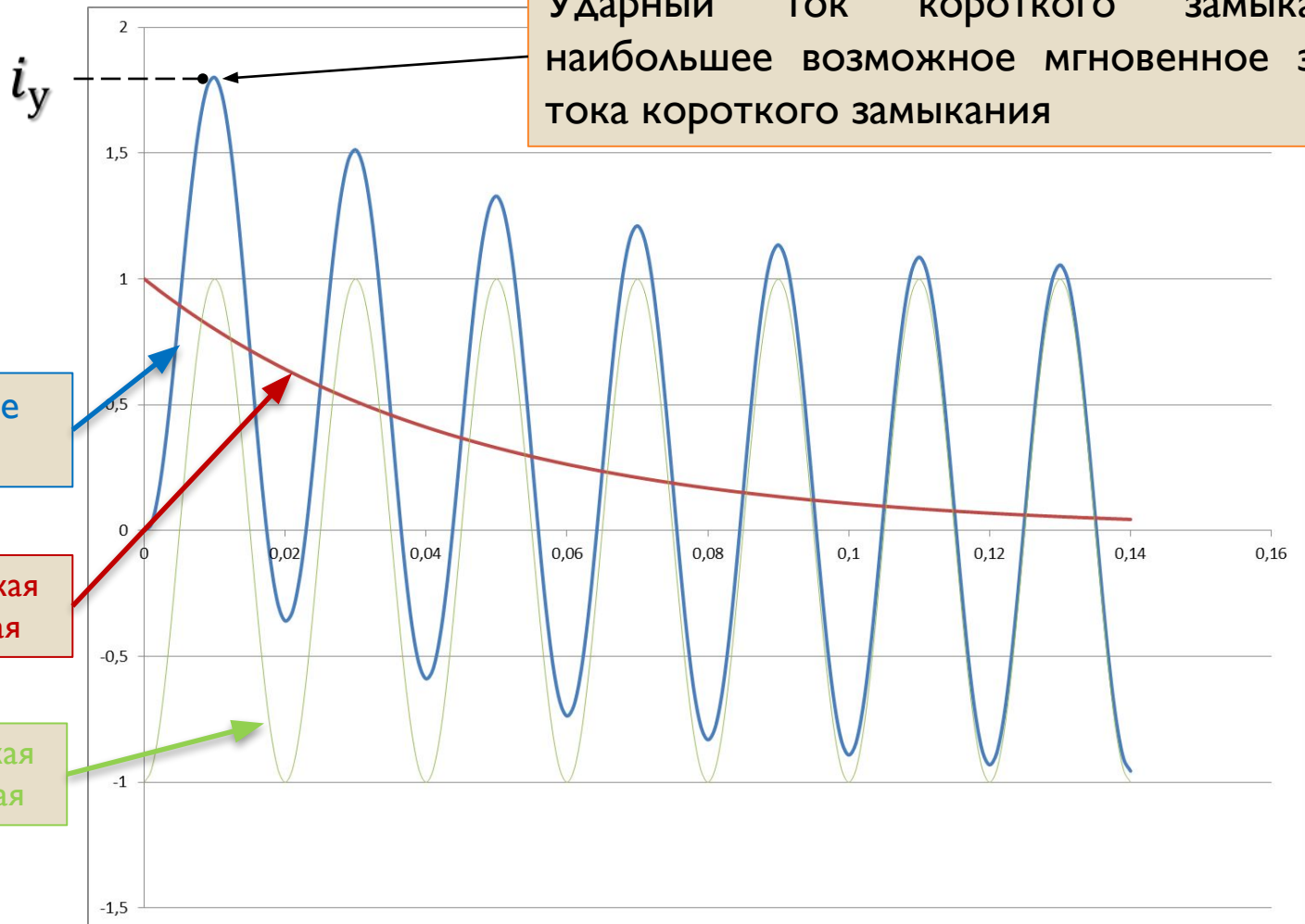


## Расчет начальной периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в сетях выше 1000 В

Основные допущения, принимаемые при решении большинства практических задач:

- 1) не учитывать сдвиг по фазе ЭДС различных синхронных машин и изменение их частоты вращения, если продолжительность КЗ не превышает 0,5 с;
- 2) не учитывать межсистемные связи, выполненные с помощью электропередачи (вставки) постоянного тока;
- 3) не учитывать поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и напряжением 330-500 кВ, если их длина не превышает 150 км;
- 4) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;
- 5) не учитывать ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;
- 6) не учитывать влияние активных сопротивлений различных элементов исходной расчетной схемы на амплитуду периодической составляющей тока КЗ, если активная составляющая результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно точки КЗ не превышает 30 % от индуктивной составляющей результирующего эквивалентного сопротивления;
- 7) приближенно учитывать затухание аperiodической составляющей тока КЗ, если исходная расчетная схема содержит несколько независимых контуров;
- 8) приближенно учитывать электроприемники, сосредоточенные в отдельных узлах исходной расчетной схемы;
- 9) принимать численно равными активное сопротивление и сопротивление постоянному току любого элемента исходной расчетной схемы.
- 10) наиболее удаленную от расчетной точки КЗ часть электроэнергетической системы допускается представлять в виде одного источника энергии с неизменной по амплитуде ЭДС и результирующим эквивалентным индуктивным сопротивлением.

$$i_{kt} = \sqrt{2}I_{\text{п0}} \sin(\omega t - \pi/2) + \sqrt{2}I_{\text{п0}} e^{-\frac{t}{T_{\text{АЭ}}}}$$



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

Мгновенное  
значение

Апериодическая  
составляющая

Периодическая  
составляющая