

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

1.1. Основные понятия и определения

Переходные режимы системы электроснабжения – это переходы ее из одного состояния в другое.

Режим – состояние системы, которое характеризуется показателями, количественно определяющими ее работу. Эти показатели называются параметрами режима. К ним относятся значения мощности, напряжения, тока, углов сдвига векторов ЭДС, напряжений, токов, частоты и т. д. Параметры режима связаны соотношениями, в которые входят параметры системы.

Параметры системы – это показатели, качественно определяющие физические свойства системы и зависящие от схемы соединения ее элементов и принятых допущений. К параметрам системы относятся значения полных, реактивных и активных сопротивлений, коэффициентов трансформации, постоянных времени, коэффициентов усиления и т.д. Например, ток в некоторой ветви сложной системы

$$I_1 = E_1 Y_{11} + E_2 Y_{12} + \dots + E_k Y_{1k}$$

определяется параметрами (ЭДС E_1, E_2, \dots, E_k) и параметрами системы (проводимостями $Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1k}$).

Ряд параметров системы в той или иной мере зависит от режима. Такая система будет **нелинейной**. Однако во многих практических задачах параметры этой системы можно полагать неизменяющимися, считая систему **линейной**.

Нелинейность другого вида в системе электроснабжения, обычно учитываемая при анализе, обусловлена характером соотношения между параметрами ее режима. Например, активная мощность связана квадратичной зависимостью с напряжением или синусоидальной — с углом нагрузки.

Режимы системы электроснабжения разделяются на две большие группы: **установившиеся режимы** и **переходные режимы** (неустановившиеся, нестационарные).

Внутри этих групп различают виды режимов:

- **нормальные установившиеся** — длительные режимы, применительно к которым при проектировании системы электроснабжения определяются ее основные технико-экономические характеристики;
- **нормальные переходные** — режимы, во время которых система переходит от одного рабочего состояния к другому;

- **аварийные** – установившиеся и переходные режимы, для которых определяются технические характеристики устройств, предназначенных для ликвидации аварии, и выясняются условия дальнейшей работы системы;
- **послеаварийные установившиеся режимы**, которые в общем случае характеризуются изменением нормальной работы системы, например, отключением какого-либо элемента или ряда элементов.

Любые переходные режимы возникают в результате изменения параметров системы, вызванных какими-либо причинами. Эти причины, называемые возмущающими воздействиями, приводят к появлению начальных отклонений параметров режима – возмущений режима.

Режим системы не является чем-то единым, он состоит из множества различных процессов. Под процессом понимается последовательная смена каких-либо явлений. В системах электроснабжения таких процессов, составляющих любой режим, огромное количество.

Основные причины, вызывающие электромагнитные переходные процессы:

- включение и отключение электродвигателей и других элементов системы электроснабжения;
- короткие замыкания в системе, а также повторные включения и отключения короткозамкнутой цепи;
- возникновение местной продольной несимметрии, например, разрыв одной или двух фаз электропередачи;
- работа устройств регулирования возбуждения синхронных машин (форсировка возбуждения и гашение поля);
- несинхронное включение синхронных машин.

Коротким замыканием называют всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, в системах с заземленной нейтралью – также замыкание одной или двух фаз на землю.

В системах с изолированными нейтралями или с нейтралями, заземленными через специальные компенсирующие устройства, замыкание одной из фаз на землю называют простым замыканием. При этом виде повреждения прохождение тока обусловлено главным образом емкостью фаз относительно земли.

При возникновении короткого замыкания в электрической системе сопротивление цепи уменьшается, что приводит к увеличению токов в отдельных ветвях системы по сравнению с токами нормального режима. Одновременно это вызывает снижение напряжения в системе электроснабжения, особенно вблизи места короткого замыкания.

В месте замыкания обычно имеется некоторое переходное сопротивление, определяемое в основном сопротивлением электрической дуги. Электрическая дуга возникает или с самого начала происшедшего повреждения (перекрытие или пробой изоляции), или через некоторое время, когда перегорит элемент, вызвавший замыкание.

Когда токи достаточно велики, сопротивление дуги приблизительно неизменно и по своему характеру почти чисто активное. С уменьшением тока и увеличением длины дуги, что имеет место при переходных процессах, ее сопротивление возрастает.

Короткие замыкания называют **металлическими**, если переходное сопротивление столь мало, что им можно пренебречь.

При прочих равных условиях ток при металлическом замыкании является наибольшим, а потому расчетным для выбора электрооборудования.

В трехфазных системах с заземленной нейтралью различают виды коротких замыканий в одной точке: трехфазное, двухфазное, однофазное на землю, двухфазное на землю.

Относительная вероятность различных основных видов короткого замыкания приведена в таблице 1.1. Как видно из этой таблицы, наиболее частым является однофазно короткое замыкание на землю, в то время как трехфазные короткие замыкания относительно редки.

Когда токи достаточно велики, сопротивление дуги приблизительно неизменно и по своему характеру почти чисто активное. С уменьшением тока и увеличением длины дуги, что имеет место при переходных процессах, ее сопротивление возрастает.

Короткие замыкания называют **металлическими**, если переходное сопротивление столь мало, что им можно пренебречь.

При прочих равных условиях ток при металлическом замыкании является наибольшим, а потому расчетным для выбора электрооборудования.

В трехфазных системах с заземленной нейтралью различают виды коротких замыканий в одной точке: трехфазное, двухфазное, однофазное на землю, двухфазное на землю.

Трехфазное короткое замыкание является симметричным, т.к. при нем все фазы остаются в одинаковых условиях. Все остальные виды коротких замыканий дают несимметричные системы, поскольку при каждом из них фазы уже находятся в неодинаковых условиях.

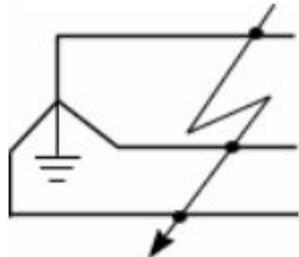
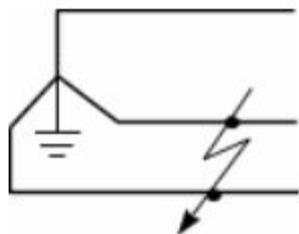
Относительная вероятность различных основных видов короткого замыкания приведена в таблице 1.1.

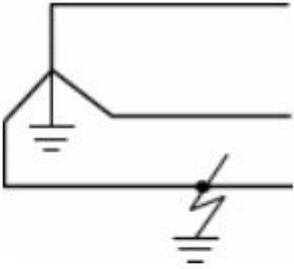
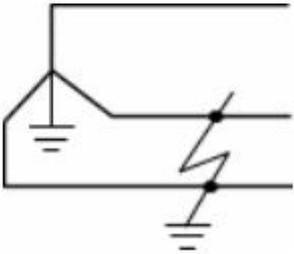
Как видно из этой таблицы, наиболее частым является однофазно короткое замыкание на землю, в то время как трехфазные короткие замыкания относительно редки. В то же время самые тяжелые условия работы электрооборудования имеют место именно при трехфазном коротком замыкании, поэтому оно, как правило, является решающим для окончательного суждения относительно возможности работы в условиях короткого замыкания.

Само изучение процесса трехфазного короткого замыкания особенно важно в связи с тем, что применение метода симметричных составляющих, который является основой для расчета несимметричных режимов, позволяет рассчитывать токи и напряжения прямой последовательности и определять их как соответственные величины при некоторых условных трехфазных замыканиях.

При этом следует отметить, что процесс включения любого трехфазного приемника, например, двигателя, по существу можно рассматривать как трехфазное короткое замыкание за некоторым сопротивлением.

Таблица 1.1 Виды коротких замыканий и их относительная вероятность

Виды коротких замыканий	Условное обозначение	Принципиальная схема	Относительная вероятность КЗ, %
Трёхфазное	$K^{(3)}$		5
Двухфазное	$K^{(2)}$		10

<p>Однофазное</p>	<p>$K^{(1)}$</p>		<p>65</p>
<p>Двухфазное на землю</p>	<p>$K^{(1.1)}$</p>		<p>20</p>

Несимметричные короткие замыкания, а также несимметричные нагрузки представляют собой различные виды **поперечной несимметрии**.

Отключение одной или двух фаз или нарушение симметрии какого-либо промежуточного элемента трехфазной цепи называют **продольной несимметрией**.

В практике эксплуатации возможны случаи одновременного появления нескольких несимметрий одинакового или различного видов. Например, возможны обрывы проводов одновременно с коротким замыканием на землю одного из них, двойное короткое замыкание на землю.

Т.е. одновременное короткое замыкание на землю разных фаз в различных точках сети, работающей с изолированной нейтралью, и другие сложные повреждения.

Короткие замыкания связаны с уменьшением сопротивления цепи, а следовательно, с ростом тока в элементах системы, снижением напряжения у потребителей.

Длительное протекание больших аварийных токов по элементам системы может способствовать тепловому и механическому разрушению элементов. Снижение напряжения может быть причиной нарушения технологических процессов вследствие торможения и остановки двигателей.

Анализ рассмотренных процессов с учетом всего множества влияющих факторов чрезвычайно сложен и практически невыполним.

Решение этих задач возможно при использовании некоторых допущений, упрощающих анализ процессов:

1) Отсутствие насыщения магнитной системы (приводит любые схемы к линейным и позволяет использовать принцип наложения).

2) Отсутствие намагничивающих токов у трансформаторов и автотрансформаторов (это допущение используется во всех случаях за исключением 3-стержневых трансформаторов с соединением Y_0/Y_0).

- 3) Отсутствие несимметрий 3-фазной системы, пренебрежение емкостными проводимостями (кроме короткого замыкания на землю и линии электропередач свыше 220 кВ).
- 4) Приближенный учет нагрузок (в зависимости от стадии переходного процесса нагрузку характеризуют некоторым постоянным сопротивлением).
- 5) Отсутствие активных сопротивлений (это допущение применяют при исследовании переходных процессов в основных звеньях высоковольтной части системы).
- 6) Отсутствие качаний генераторов.

В России и за рубежом в течение многих лет повышенный интерес проявляется к проблеме управления электромеханическими переходными процессами при больших возмущениях в электроэнергетических системах (ЭЭС) и к использованию для ее решения синхронных генераторов на электростанциях. Высокое быстродействие современных автоматических регуляторов возбуждения (АРВ), и тем более выполняемых на микропроцессорной основе, позволяет достаточно эффективно демпфировать электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах, обусловленные **взаимными качаниями** роторов синхронных генераторов даже после больших возмущений в системе, включая и наиболее тяжелые короткие замыкания.

В зависимости от степени загрузки энергоагрегатов в исходном режиме и от наличия значительной местной нагрузки на электростанциях, а также при работе на выделенный район ЭЭС, содержащей собственные источники генерации активной мощности, могут возникать слабозатухающие качания роторов генераторов и даже их раскачивание с выходом синхронных генераторов из синхронизма

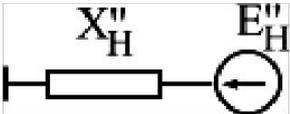
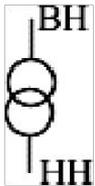
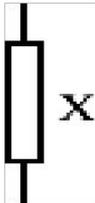
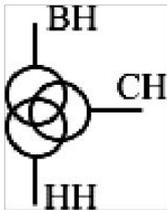
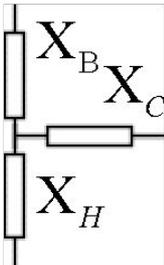
1.2. Схемы замещения

Схему замещения СЭС составляют на основе ее расчетной схемы для начального момента переходного процесса. Переход от расчетной схемы к схеме замещения сводится к замене расчетной схемы эквивалентной электрической цепью, включающей в себя источники ЭДС и неизменные сопротивления, и к преобразованию параметров элементов и ЭДС различных ступеней СЭС к базисным условиям (к одной ступени напряжения, выбранной за основную).

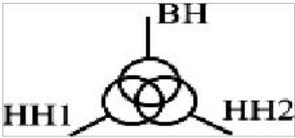
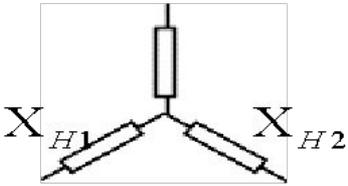
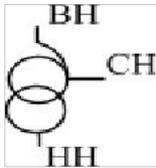
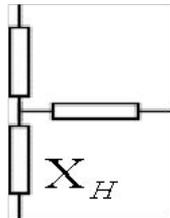
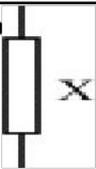
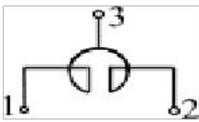
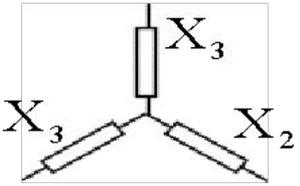
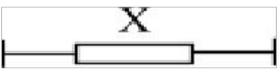
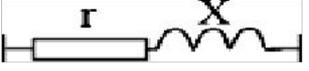
Таблица 1.2. Расчетные схемы и схемы замещения элементов СЭС

Наименование элемента	Схемы	
	Расчетная	Замещения
1	2	3
Генератор, синхронный компенсатор		
Эквивалентный источник системы		
Синхронный двигатель		
Асинхронный двигатель		

Продолжение таблицы 1.2.

1	2	3
Обобщенная нагрузка		
Двухобмоточный трансформатор		
Трехобмоточный трансформатор		

Продолжение таблицы 1.2.

<p>Трехфазный трансформатор с расщепленной обмоткой НН</p>		
<p>Трехфазный автотрансформатор</p>		
<p>Реактор</p>		
<p>Сдвоенный реактор</p>		
<p>Воздушная линия</p>		
<p>Кабельная линия</p>		

1.2.1. Точное и приближенное приведение параметров элементов

Различают точное и приближенное приведение параметров для составления схемы замещения СЭС.

При точном приведении ЭДС и параметров элементов используют действительные коэффициенты трансформации трансформаторов между ступенями напряжений расчетной схемы СЭС.

Пусть цепь некоторой ступени напряжения схемы связана с выбранной в этой схеме основной рядом складно включенных трансформаторов с коэффициентами трансформации K_1, K_2, \dots, K_{II}

Используя известные соотношения для ЭДС (напряжений), токов и сопротивлений при приведении их с одной стороны трансформатора на другую, можно записать общие выражения для определения приведенных к основной ступени значений отдельных величин этой цепи:

$$\left. \begin{aligned}
 \overset{0}{E} &= K_1 K_2 \dots K_{II}; \\
 \overset{0}{U} &= K_1 K_2 \dots K_{II}; \\
 \overset{0}{I} &= \frac{I}{K_1 K_2 \dots K_{II}}; \\
 \overset{0}{Z} &= (K_1 K_2 \dots K_{II})^2 Z,
 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

т.е. истинные величины должны быть пересчитаны столько раз, сколько имеется трансформаторов на пути между приводимой цепью и принятой основной ступенью.

В этих и последующих выражениях под коэффициентом трансформации каждого трансформатора или автотрансформатора (как повышающего, так и понижающего) понимается отношение междуфазного напряжения холостого хода его обмотки, обращенной в сторону основной ступени напряжения, к аналогичному напряжению его другой обмотки, находящейся ближе к ступени, элементы которой подлежат приведению.

$$Z = Z(H) \frac{U_H}{\sqrt{3}I_H}. \quad (1.2)$$

В отличие от рассмотренного приведения по действительным коэффициентам трансформации в практических расчетах часто выполняют приближенное приведение, позволяющее значительно быстрее и проще получить приближенную схему замещения.

В этом случае рекомендуется замена действительных напряжений холостого хода трансформаторов (автотрансформаторов), а также номинальных напряжений различных элементов (кроме реакторов) расчетной схемы, находящихся на одной ступени трансформации, средними номинальными напряжениями $U_{ср}$. Шкала этих напряжений следующая: 515; 340; 230; 158; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,4; 0,23; 0,127 кВ.

Следовательно, при приближенном приведении выражения для пересчета принимают более простой вид:

$$\overset{0}{E} = \frac{U_{\text{ф.б}}}{U_{\text{ф}}} E,$$

$$\overset{0}{U} = \frac{U_{\text{ф.б}}}{U_{\text{ф}}} U,$$

$$\overset{0}{I} = \frac{U_{\text{ф.б}}}{U_{\text{ф}}} I,$$

$$\overset{0}{Z} = \left(\frac{U_{\text{ф.б}}}{U_{\text{ф}}}\right)^2 Z,$$

(1.3)

где $U_{\text{ср}}$ – среднее номинальное напряжение ступени, с которой производится перерасчет;
 $U_{\text{ср.б}}$ – то же выбранной основной ступени.

Если элемент задан своим относительным сопротивлением $Z_{(H)}$, то его сопротивление в именованных единицах можно определить по (1.2), вводя в последнее место U_H среднее номинальное напряжение основной ступени.

Приближенное приведение схемы вносит некоторую погрешность в расчет. Для получения более достоверных результатов приведение схемы следует производить по действительным коэффициентам трансформации, особенно, когда имеются трансформаторы с широким регулированием напряжения.

1.2.2. Использование относительных единиц

При решении задач о переходных процессах удобно использовать специальный метод предоставления информации – **систему относительных единиц**, которая дает универсальность записи математических уравнений и упрощает использование как конечных, так и промежуточных результатов.

Относительным значением некоторой физической величины называется отношение этой физической величины к некоторой другой именованной величине, выбранной за базисную.

В большинстве расчетов переходного процесса в качестве базисных величин наиболее удобно выбирать мощность трех фаз S_B и линейное напряжение U_6 , все остальные базисные величины можно вычислить.

Для того, чтобы между относительными величинами выполнялись соотношения, отвечающие законам Ома и Кирхгофа, базисный ток и сопротивление определяют:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6}; \quad |Z_6| = \frac{U_6}{\sqrt{3}I_6}. \quad (1.4)$$

Базисные величины — всегда именованные числа, а тип (вещественный, комплексный) относительных величин определяется типом именованных.

При выбранных базисных условиях относительные ЭДС, напряжение, сопротивление, ток определяются так:

$$\frac{E}{U_{\phi}^{*(6)}} = \frac{E}{U}, \quad \frac{U}{U_{\phi}^{*(6)}} = \frac{U}{U}, \quad \frac{U}{U_{\phi}^{*(6)\phi}} = \frac{U_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{\sqrt{3}U_{\phi}} = \frac{U}{U} = U^{*(6)} ;$$

$$\frac{Z}{U_{\phi}^{*(6)}} = \frac{Z}{Z_{(6)}} = \frac{Z \cdot S_{\phi}}{U_{\phi}^2} = r \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}^2} + jx \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}^2} ;$$

$$\frac{Z}{U_{\phi}^{*(6)}} = \frac{Z}{Z_{(6)}} = Z \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}^2}, \quad \frac{\dot{i}}{I_{\phi}^{*(6)}} = \frac{\dot{i}}{I_{\phi}} = \frac{I' + jI''}{I_{\phi}} = \frac{I'}{I_{\phi}} + j \frac{I''}{I_{\phi}}.$$

(1.5)

Здесь знак “*” означает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс (б) – приведена к базисным условиям.

Переход от относительной величины к именованной Π выполняется по формуле

$$\Pi = \Pi_{* (б)} \Pi_{б}.$$

Если паспортные параметры элемента выражены в относительных единицах, следовательно, они отнесены к номинальным параметрам этого же устройства.

В этом случае при базисных условиях паспортные данные будут определяться как

$$U_{*K(б)} = U_{*K(Н)} \frac{U_H}{U_б} = \frac{U_K}{100} \frac{U_H}{U_б}; \quad Z_{*(б)} = Z_{*(Н)} \frac{Z_H}{Z_б}. \quad (1.6)$$

Система относительных единиц распространяется не только на электрические величины.

Если в качестве базисных принять синхронную угловую скорость ω_c , т.е. $\omega_б = \omega_c$, тогда $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_б}$.

Соответственно этому принимаем

для индуктивности $L_{* (б)} = x_{* (б)}$

для потокосцепления $\Psi_{* (б)} = U_{* (б)}$

Время также удобно выражать в
относительных единицах.

Если базисное время принять $t_{\delta} = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{\omega_{\delta}}$

тогда постоянная времени

$$T_{* (\delta)} = \frac{T}{t_{\delta}} = T \omega_c = \frac{L}{r} = \frac{\omega L}{\omega_c r} = \frac{x}{\omega r} = \frac{x_{* (\delta)}}{\omega_c r_{* (\delta)}}.$$

1.2.3. Типовые формулы для приведения параметров элементов к базисным условиям в относительных единицах

Если расчеты электромагнитных переходных процессов производятся в относительных единицах, то приведение параметров расчетной схемы совмещается с выражением их в относительных единицах.

Соответствующие формулы выводятся по схеме:

1. исходный параметр расчетной ступени определяется в именованных единицах;
2. осуществляется его приведение к базисной ступени;
3. результат делится на соответствующую базисную величину; при этом вспомогательные базисные и номинальные величины выражаются через основные.

Полученные таким образом формулы сведены в таблицу 1.3.

Таблица 1.3. Формулы для расчета в относительных единицах

№	Параметр	Форма задания	Форма приведения
1	Напряжения и ЭДС	В именованных единицах	$\dot{E}_{* (б)} = \frac{E}{U_H}$ $\dot{U}_{* (б)} = \frac{U}{U_{(H)}}$
		В относительных единицах по отношению к номинальным	$\dot{E}_{* (б)} = \dot{E}_{(H)}$ $\dot{U}_{* (б)} = \dot{U}_{(H)}$

Таблица 1.3. Формулы для расчета в относительных единицах
(продолжение)

2	Токи	В именованных единицах	$I_{*(\sigma)} = I \frac{\sqrt{3}U_H}{S_\sigma}$
		В относительных единицах по отношению к номинальным	$I_{*(\sigma)} = I_{(H)} \frac{S_H}{S_\sigma}$
3	Сопротивления	В именованных единицах	$Z_{*(\sigma)} = Z \frac{S_\sigma}{U_H^2}$
		В относительных единицах по отношению к номинальным	$Z_{*(\sigma)} = Z_{(H)} \frac{S_\sigma}{S_H}$

Аналогично получены формулы, используемые для приведения параметров элементов (сопротивлений) схем в относительных единицах с учетом различия их номинальных параметров (табл. 1.4).

Таблица 1.4. Формулы для приведения сопротивлений элементов схем для расчета в относительных единицах

№	Элемент СЭС	Заданные параметры	Расчетная формула
1	Система (источник питания неизменного напряжения)	Напряжение U_H за сопротивлением x_c в именованных единицах	$x_{*c(b)} = x_c \frac{S_b}{U_H^2}$
2	То же	Напряжение U_H и ток короткого замыкания I_K в именованных единицах	$x_{*c(b)} = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_H I_K}$

Таблица I.4. Формулы для приведения сопротивлений элементов схем для расчета в относительных единицах (продолжение)

3	—//—	Напряжение U_n и мощность короткого замыкания S_K в именованных единицах	$x_{*c(\bar{b})} = \frac{S_{\bar{b}}}{S_K}$
4	—//—	Мощность S_n и напряжение U_c в именованных единицах и сопротивлением $x_{c(n)}$ в относительных единицах	$x_{*c(\bar{b})} = x_{c(n)} \frac{S_{\bar{b}}}{S_n}$
5	Токоограничивающий реактор	Напряжение U_n , ток I_n в именованных единицах, сопротивление $x_{p(n)}$ в относительных единицах	$x_{*p(\bar{b})} = x_{p(n)} \frac{S_{\bar{b}}}{\sqrt{3} I_n U_n}$
6	Нагрузки, учитываемые эквивалентным сопротивлением	Мощность S_n в именованных единицах	$Z_{*n(\bar{b})} = \frac{S_{\bar{b}}}{S_n}$

При включении синхронных генераторов, компенсаторов и электродвигателей на ступень напряжения n с базисным напряжением $U_{бн} = U_{ном}$ или $U_{бн} = U_{ср}$.

$$x_{*(б)}'' = x_{*d}'' \cdot S_v / S_{ном} \quad (1.7)$$

на ступень n с $U_{бн} \neq U_{ном}$

$$x_{*(б)}'' = x_{*d}'' \cdot (S_v / S_{ном}) (U_{ном}^2 / U_{бн}^2) \quad (1.8)$$

где x_{*d}'' - продольная составляющая сопротивления в начальный момент короткого замыкания.

Для синхронных двигателей $x_{*ном} = 1/I_{*пуск}$, где $I_{*пуск} = I_{пуск} / I_{ном}$ – кратность пускового тока при пуске от полного напряжения. Для асинхронных двигателей $x_{*ном} = x_*'' = 1/I_{*пуск}$.

При включении трехфазных двухобмоточных трансформаторов на ступень напряжения n с базисным напряжением $U_{бп} = U_{ном}$ или $U_{бт} = U_{ср}$

$$x_{*(б)} = (U_K / 100) S_{б} / S_{ном} \quad (1.9)$$

на ступень напряжения n с $U_{\text{бп}} \neq U_{\text{НОМ}}$

$$x_{*}(\text{б}) = (U_{\text{к}} / 100)(S_{\text{б}} / S_{\text{НОМ}})(U_{\text{НОМ}}^2 / U_{\text{бп}}^2) \quad (1.10)$$

В случае трехфазных трехобмоточных трансформаторов или автотрансформаторов

$$\left. \begin{aligned} x_{*B(\text{б})} &= 0,5(U_{\text{KB-H}} + U_{\text{KB-C}} - U_{\text{KC-H}})S_{\text{б}} / (100S_{\text{НОМ}}) \\ x_{*C(\text{б})} &= 0,5(U_{\text{KB-C}} + U_{\text{KC-H}} - U_{\text{KB-H}})S_{\text{б}} / (100S_{\text{НОМ}}) \\ x_{*H(\text{б})} &= 0,5(U_{\text{KB-H}} + U_{\text{KC-H}} - U_{\text{KB-C}})S_{\text{б}} / (100S_{\text{НОМ}}) \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

При включении трехфазных двухобмоточных трансформаторов с расщепленной обмоткой НН и при отдельной работе обмоток НН1, НН2

$$\left. \begin{aligned} x_{*в(\bar{b})} &= U_{кВ-Н1(Н2)} (1 - K_{расщ} / 4) S_{\bar{b}} / (100 S_{ном}) \\ K_{*н1(\bar{b})} \approx x_{*н2(\bar{b})} \approx U_{кВ-Н1(Н2)} K_{расщ} S_{\bar{b}} / (100 S_{ном}) \end{aligned} \right\} (1.12)$$

где $K_{расщ}$ - коэффициент расщепления. При $K_{расщ} = 3,5$

$$\left. \begin{aligned}
 x_{*B(\delta)} &= 0,125 U_{KB-H1(H2)} S_{\delta} / (100 S_{НОМ}) \\
 x_{*H1(\delta)} &= x_{*H2(\delta)} = 1,75 U_{KB-H1(H2)} S_{\delta} / (100 S_{НОМ})
 \end{aligned} \right\} (1.13)$$

В случае параллельной работы обмоток НН1 и НН2 трансформатор с расщепленной обмоткой можно рассматривать как два двухобмоточных трансформатора.

Активное сопротивление трансформатора определяется через мощность активных потерь при коротком замыкании $\Delta P_{кз}$

$$r_{*T(\sigma)} = \Delta P_{кз} \frac{S_{\sigma}}{S_H}$$

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОСТЕЙШИХ 3-ФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Простейшей называют симметричную 3-фазную цепь с сосредоточенными параметрами при отсутствии в ней трансформатора. Питание осуществляется от источника бесконечной мощности, который характеризуется тем, что его собственное сопротивление равно нулю, а напряжение, изменяясь с постоянной частотой, имеет неизменную амплитуду.

К задачам такого рода относятся исследования переходных процессов в элементах системы электроснабжения, имеющих большую электрическую удаленность от источников энергии. При этом мощность источников на два и более порядков превосходит мощность потребителей системы электроснабжения.

Целью таких задач является выработка инженерной методики количественной и качественной оценки параметров режима, определение экстремальных значений параметров аварийных переходных режимов.

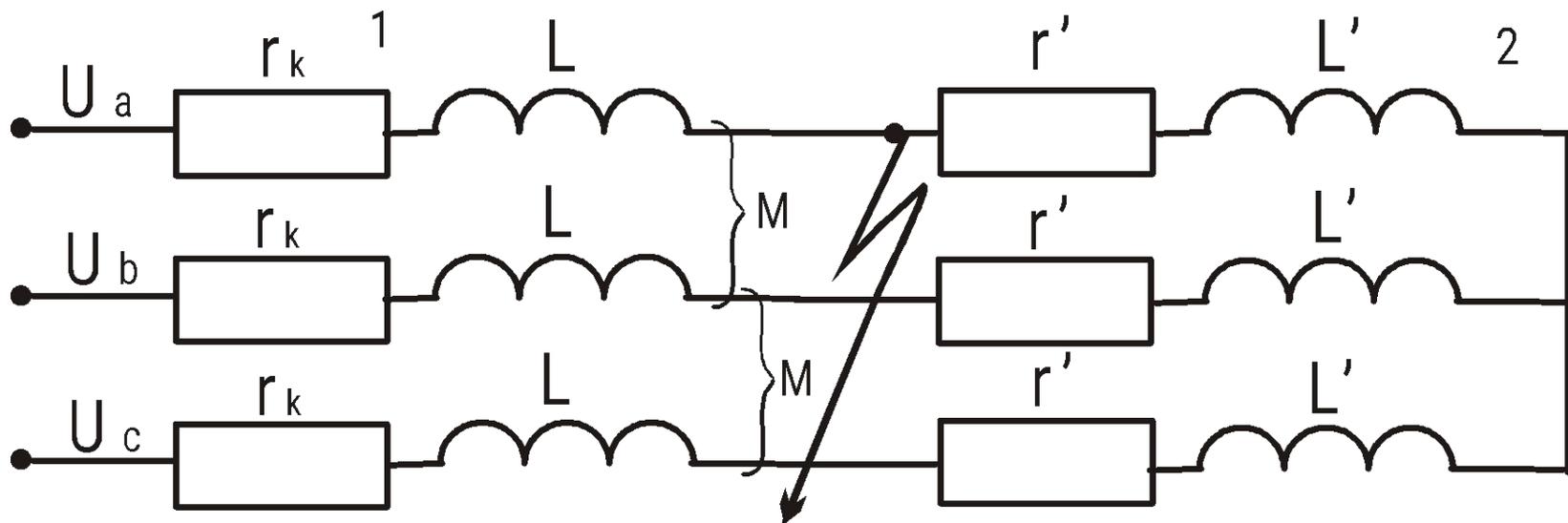


Рис. 2.1. Простейшая 3-фазная электрическая цепь

Фазные напряжения для данной схемы можно определить:

$$\begin{aligned} u_A &= U_m \sin(\omega t + \alpha), \\ u_B &= U_m \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ), \\ u_C &= U_m \sin(\omega t + \alpha - 240^\circ), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где U_m - амплитуда напряжений;

α - фаза включения;

t - время.

В точке К в момент времени $t = 0$ возникает 3-фазное металлическое замыкание (замыкание между фазами через пренебрежимо малое переходное сопротивление).

После возникновения короткого замыкания схема распадается на две независимые части, причем во второй части цепи отсутствуют источники. Следовательно, в этой части будут иметь место только процессы рассеяния запасов энергии.

Переходные процессы в первой части схемы можно представить дифференциальным уравнением

$$u_A = i_A r_K + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} \quad (2.2)$$

где M – коэффициент взаимной индукции;

Учитывая, что $i_B + i_C = -i_A$, и опуская индекс фазы, имеем

$$u = ir_K + L_K \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

где r_K – активное сопротивление в цепи короткого замыкания;

L_K – результирующая индуктивность фазы, $L_K = L - M$.

Решение уравнения (2.3) имеет вид:

$$i = \frac{U_m}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + C e^{-t/T_K} \quad (2.4)$$

где Z_K – модуль полного сопротивления цепи короткого замыкания;

φ_K – угол фазы сдвига тока в цепи короткого замыкания;

C – постоянная, определяемая из начальных условий;

T_K – постоянная времени цепи короткого замыкания,

$$T_K = L_K / r_K = x_K / (\omega r_K) = L / r = x_K / (\omega r_K),$$

x_K – индуктивное сопротивление в цепи короткого замыкания.

Первое слагаемое правой части уравнения (2.4) – принужденный ток нового режима, постоянный по амплитуде:

$$I_{nm} = \frac{U_m}{Z_K} \quad (2.5)$$

Вторая составляющая тока КЗ – аperiодическая. Она затухает по экспоненциальному закону с постоянной времени T_K .

Начальное значение аperiодической составляющей тока короткого замыкания найдем из условия неизменности тока в первый момент короткого замыкания ($t = 0$).

$$\frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \phi) = \frac{U_m}{Z_K} \sin(\alpha - \phi_K) + C \quad (2.6)$$

откуда начальное значение апериодической составляющей $i_{a(0)} = C$

$$C = i_{a(0)} = I_m \sin(\alpha - \phi) - I_{nm} \sin(\alpha - \phi_K)$$

где I_m , ϕ - амплитуда и фаза тока в режиме, предшествующем короткому замыканию.

Таким образом, полный ток в цепи после короткого замыкания

$$i = i_n + i_a = I_{nm} \sin(\omega t + \alpha - \phi_K) + [I_m \sin(\alpha - \phi) - I_m \sin(\alpha - \phi_K)] e^{-t/T_K}, \quad (2.8)$$

где i_n - мгновенное значение периодической составляющей т.КЗ

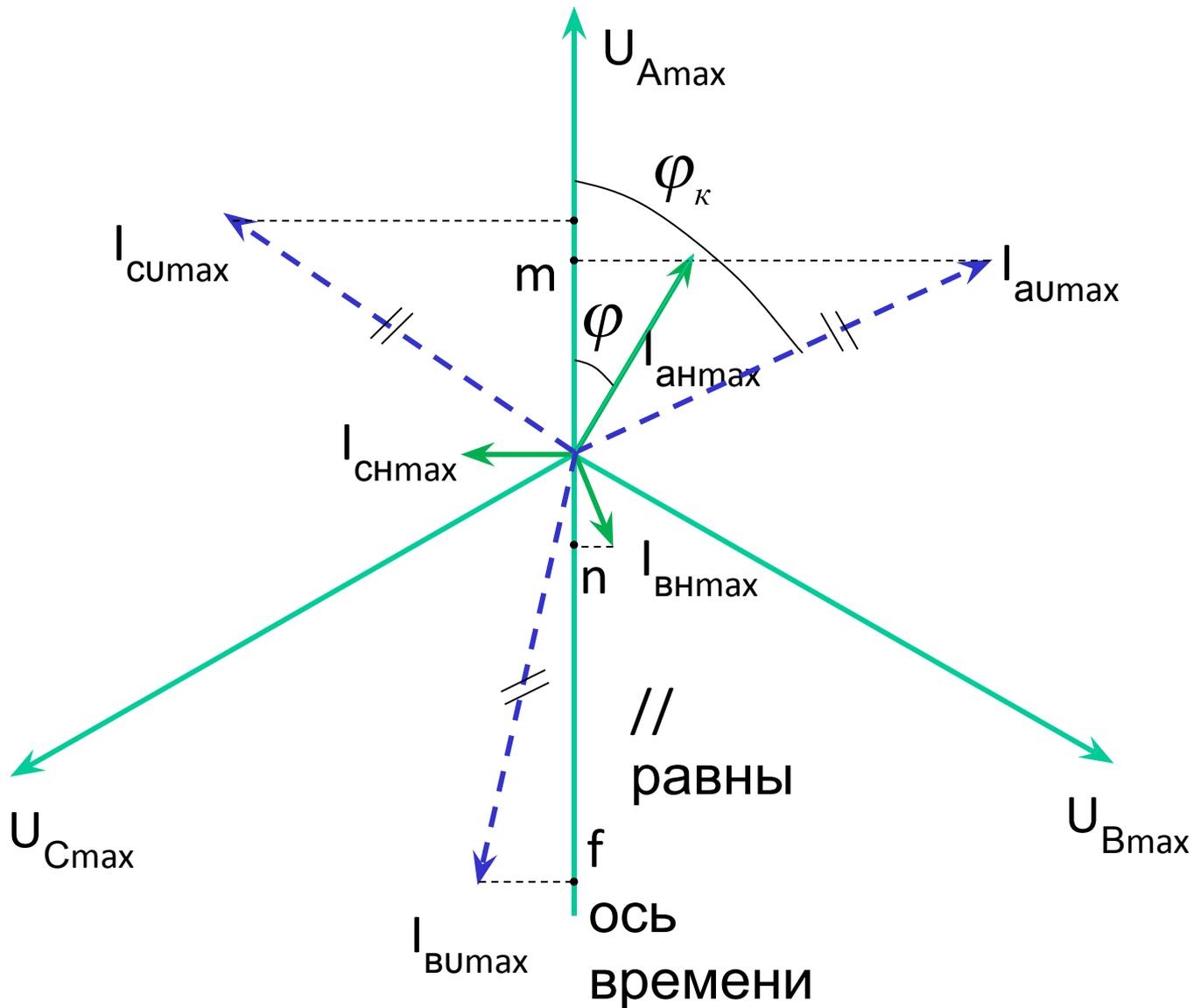
Физическая сущность КЗ

- Для выяснения физической сущности рассмотрим явления в каждой фазе.
- Значения установившихся токов КЗ

$$I_{a\vartheta \max} = I_{b\vartheta \max} = I_{c\vartheta \max}$$

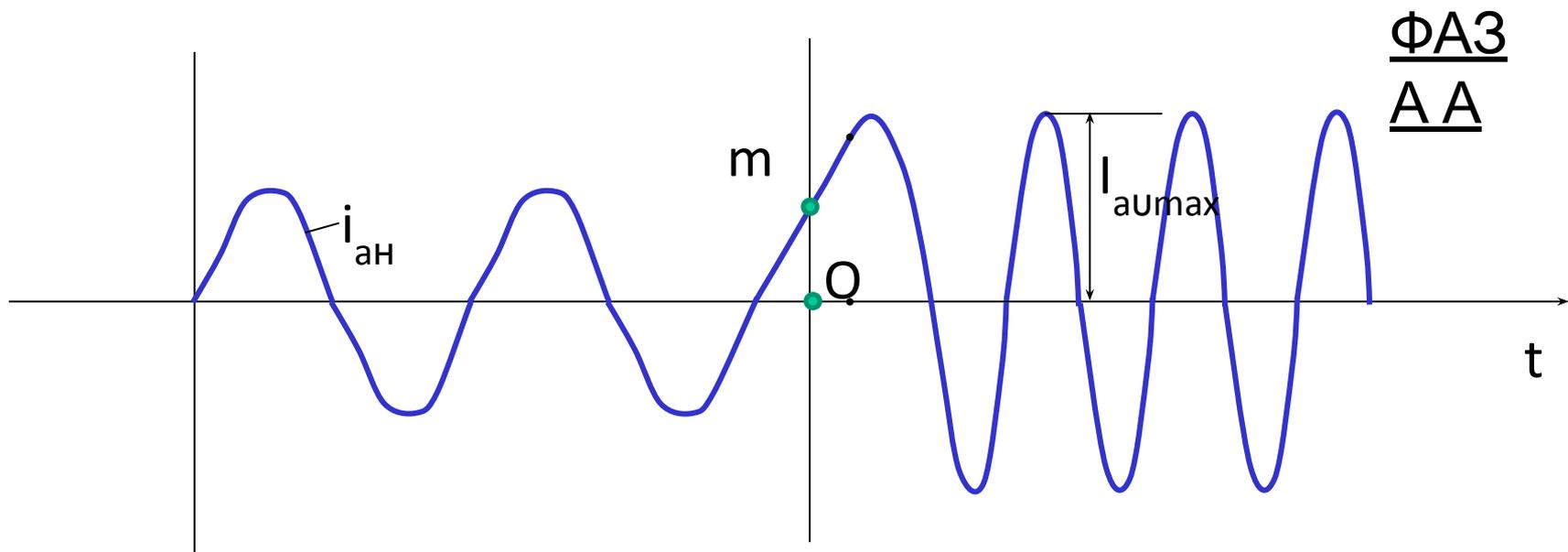
- Однако процесс изменения токов от величин нормального режима до КЗ может протекать по-разному, в связи с эти могут изменяться величины максимальных токов в отдельных фазах в первый полупериод.
- Для выяснения этого процесса рассмотрим, какие явления произойдут в каждой из фаз, если ось времени совпадает, например, с направлением $U_{a \max}$ в момент, когда произошло КЗ

Векторная диаграмма при симметричном КЗ.



В фазе а – величина токов нормального режима и КЗ для начального момента времени $t=0$ равны.

$$i_{aH_{t=0}} = i_{aV_{t=0}} = Om$$



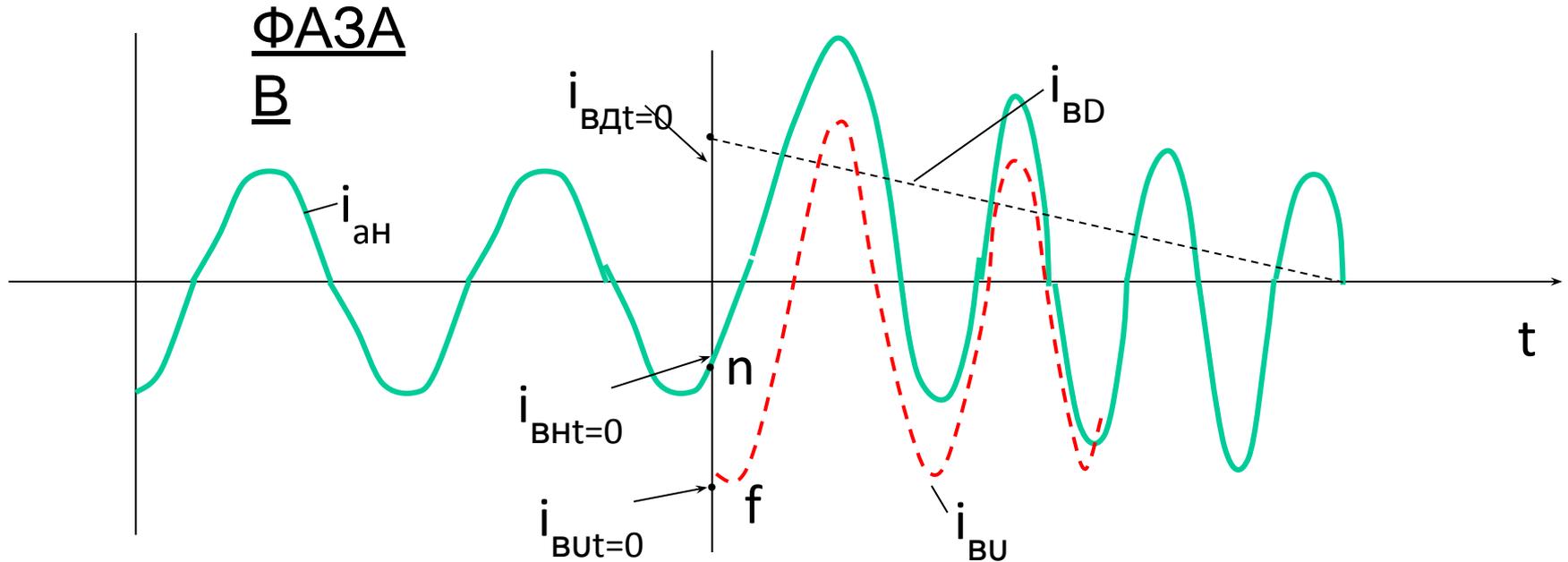
Следовательно, никакого изменения магнитного потока в начальный момент не произойдет и синусоидальная кривая тока предшествующего режима перейдет в синус кривую КЗ.

Иначе протекает переходящий процесс в фазе b .

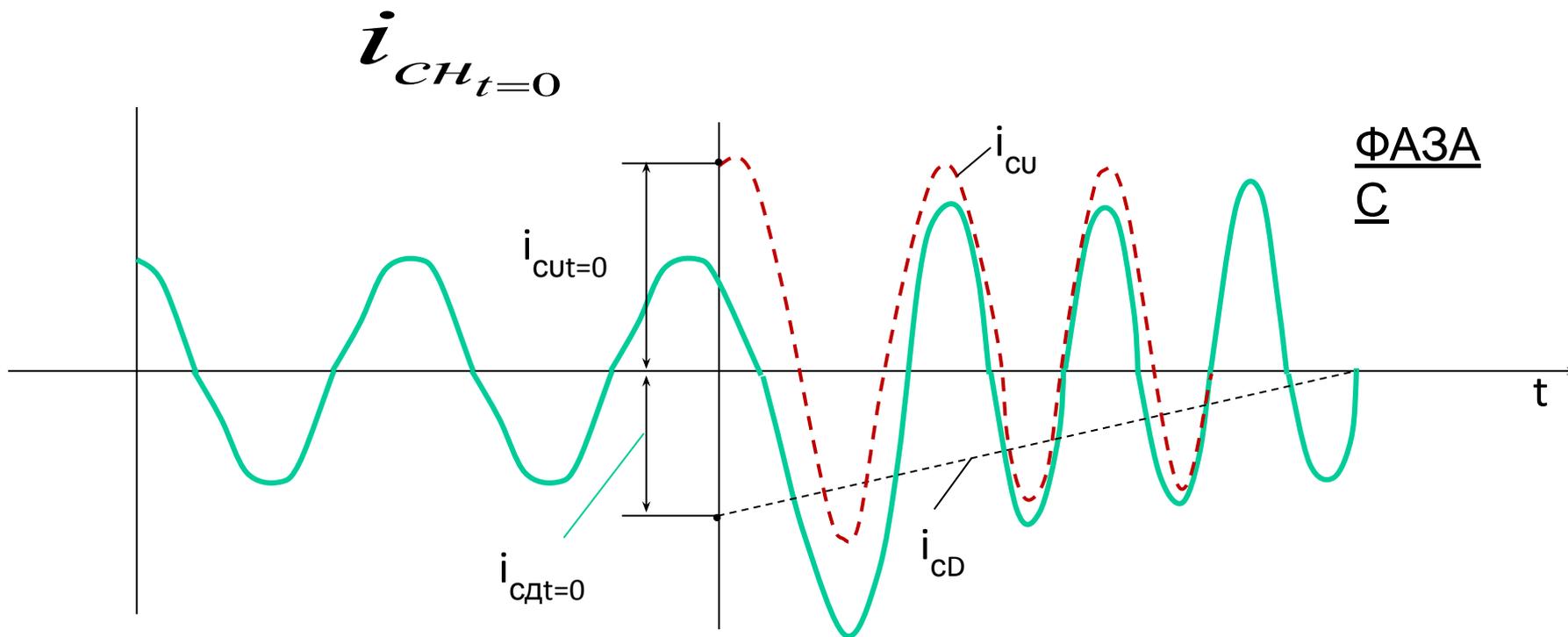
Из векторной диаграммы видно, что в начальный момент $t=0$ ток предшествующего режима не равен току после КЗ. Как следует из правил Ленца ток в цепи не может измениться мгновенно, поэтому процесс установления новой величины тока можем рассматривать как два физических процесса: образование вынужденного тока КЗ сразу в момент КЗ (при $t=0$), равного по величине $i_{bD_{t=0}}$ и, следовательно, образование нового магнитного потока (тоже возбужденного), вокруг проводника фазы b и второй процесс – образование свободного тока $i_{bD_{t=0}}$ и соответствующего ему магнитного потока, направленного таким образом, чтобы начальные физические условия в цепи сохранились.

Это значит, что действительная величина тока КЗ, равна алгебраической сумме вынужденного и свободного токов:

$$i_{bH_{t=0}} = i_{KЗдейств_{t=0}} = i_{b\vartheta_{t=0}} + i_{bD_{t=0}}$$



По векторной диаграмме видно, что для фазы С равно нулю (проекция на ось времени). А проекция тока КЗ – большая.



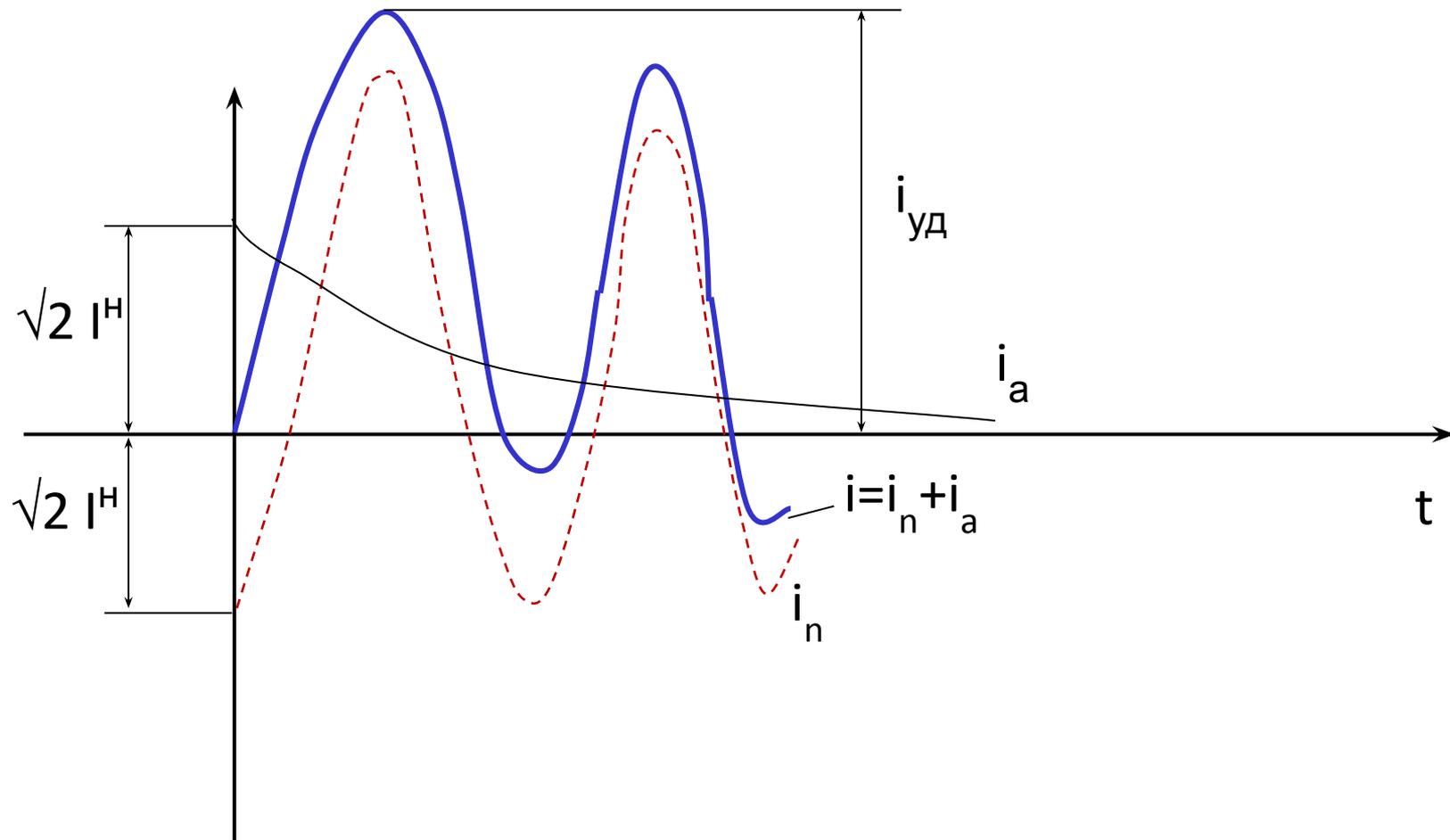
Рассмотренные кривые показывают, что действительное значение тока КЗ зависит не только от сопротивлений цепи, которые определяют значение вынужденного тока, но и от момента возникновения аварийного режима.

Наибольшей величины ток КЗ достигает в том случае, когда ток предшествующего режима в момент КЗ равен нулю, а вынужденный ток в этот же момент имеет максимум.

В данном случае величина свободного тока будет равна наибольшему значению вынужденного тока:

$$i_{D_{t=0}} = I_{\vartheta \max}$$

Зависимость токов КЗ от времени



2.1.1. Ударный ток короткого замыкания

Ударным током короткого замыкания называют максимальное мгновенное значение полного тока при наиболее неблагоприятных условиях.

Для электрических схем с преобладанием индуктивности таковые имеют место, если доаварийным режимом был холостой ход, а короткое замыкание происходит в момент прохождения напряжения через нуль (рис. 2.4).

При этом периодическая составляющая тока КЗ начинается с амплитудного значения. Согласно законам коммутации в первый момент КЗ начальное значение апериодической составляющей оказывается максимально возможным и равным амплитуде периодической составляющей тока КЗ

$$I_{a(0)} = I_{nm}$$

Наибольшее мгновенное значение полного тока короткого замыкания – ударный ток возникает при первом наибольшем значении апериодической составляющей, совпадающей по знаку с периодической составляющей тока короткого замыкания. Этот момент наступает примерно через полпериода после появления короткого замыкания. При этом условии ударный ток

$$\begin{aligned}
 I_y &= I_{\text{п м}} + I_{\text{п м}} e^{-0,01/Ta} = \\
 &= I_{\text{п м}} (1 + e^{-0,01/Ta}) = I_{\text{п м}} k_y.
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

Величину $k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}$ называют ударным коэффициентом, характеризующим превышение ударного тока над амплитудой периодической составляющей тока КЗ

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}} = i_y / I_{mn} \quad (2.10)$$

Ударный коэффициент зависит от постоянной времени затухания апериодической составляющей $T_a = x_k / (314r_k)$. При $x_k / r_k \rightarrow 0$ $k_y \rightarrow 1$, а при $x_k / r_k \rightarrow \infty$ $k_y \rightarrow 2$, т.е. значения ударного коэффициента изменяются в пределах

$$1 < k_y < 2.$$

Зависимость ударного коэффициента от отношения $x_{к.}/r_{к}$ (постоянной времени T_a) изображена на рис. 2.5. За интервал $3T_a$ апериодическая составляющая тока КЗ практически затухает.

В практических расчетах ударный ток определяют по формуле

$$i_y = k_y \sqrt{2} I'' \quad (2.11)$$

где I'' - сверхпереходный ток КЗ (действующее значение периодической составляющей в первый момент КЗ).

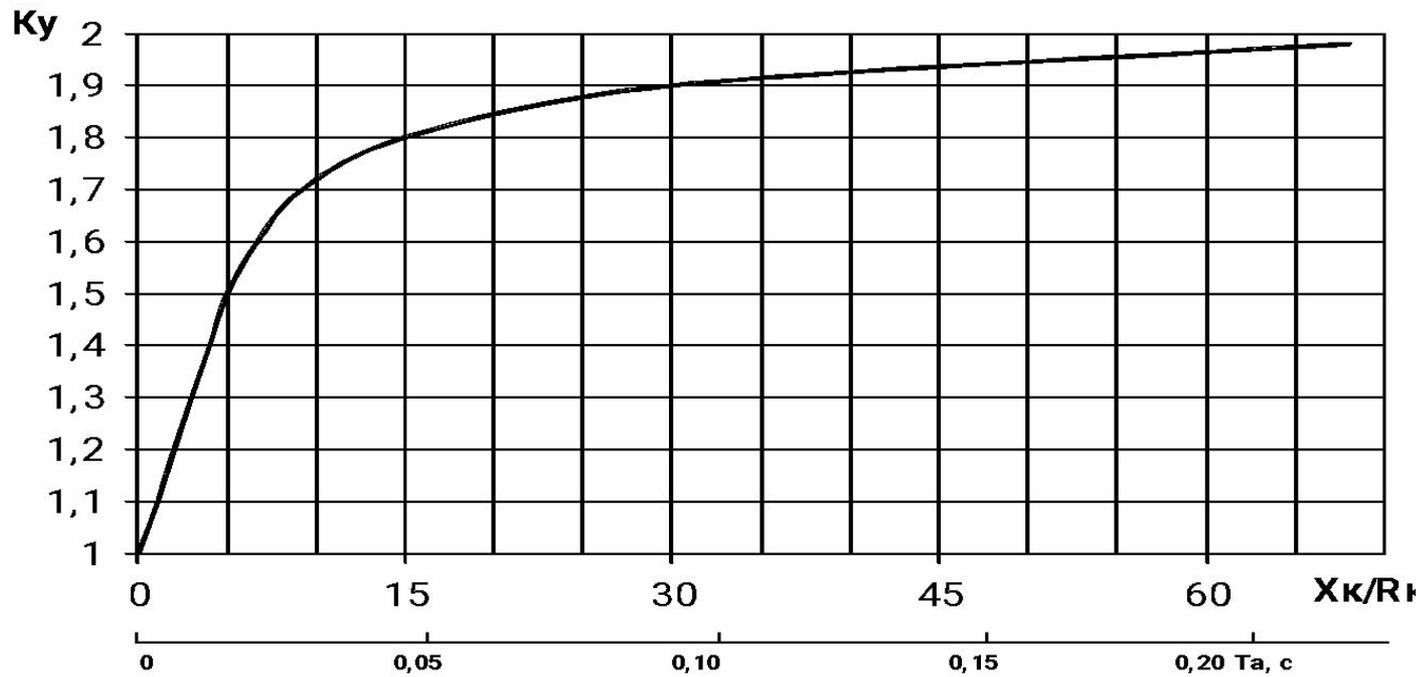


Рис. 2.5. Зависимость ударного коэффициента от отношения X_k/r_k и постоянной времени короткозамкнутой цепи

2.1.2. Действующее значение тока КЗ и его составляющих

Действующее значение полного тока КЗ в произвольный момент времени t переходного процесса можно определить как среднеквадратичное значение тока за период T , в середине которого находится рассматриваемый момент, т.к. в течение всего переходного процесса полный ток представляет собой несинусоидальную кривую.

При этом считают, что за рассматриваемый период амплитуда периодической составляющей и апериодическая составляющие неизменны и равны их среднему значению в рассматриваемый момент времени.

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t+\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i^2 dt} \quad (2.12)$$

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ I_y приходится на первый период переходного процесса. Оно определяется в предположении, что апериодическая составляющая в течение этого периода равна ее мгновенному значению в середине периода, т.е. через 0,01 с после возникновения короткого замыкания, а периодическая составляющая - своему начальному значению

$$I_y = \sqrt{i_{n0}^2 + (i_{a0} e^{-\frac{0.01}{T_a}})^2} \quad (2.13)$$

Считая, что $i_{a0} = I_{n\max} = \sqrt{2}I''$, получаем

$$I_y = \sqrt{(I'')^2 + (\sqrt{2}I''e^{-\frac{0.01}{Ta}})^2} \quad (2.14)$$

Так как $e^{-\frac{0.01}{Ta}} = k_y - 1$, действующее значение полного тока КЗ

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2} \quad (2.15)$$

При изменении ударного коэффициента в пределах $1 < k_y < 2$ отношение I_y / I'' остается в

пределах $1 \leq \frac{I_y}{I''} < \sqrt{3}$

и имеет максимальное значение при $k_y = 1,5$.