

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования «Майкопский государственный технологи-
ческий университет»

ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ

учебно-методическое пособие для студентов очной и заочной форм обучения
по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Майкоп 2019

УДК 621.311(07)

ББК 31.2

П 27

Составитель: Старков Н.Н., кандидат технических наук, доцент

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ.....	5
1.1. Основные определения.....	5
1.2. Причины и последствия коротких замыканий.....	7
1.3. Назначения расчетов и требования к их точности.....	8
2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ЛЮБОГО ВИДА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.....	9
2.1. Основные допущения.....	9
2.2. Понятие о расчетных условиях. Составление схемы замещения....	10
2.3. Методы приведения параметров элементов, выраженных в именован- ных единицах при номинальных условиях, к базисной ступени напряжения.....	14
2.3.1. Точное приведение в именованных единицах.....	15
2.3.2. Приближенное приведение в именованных единицах.....	17
2.3.3. Точное приведение в относительных единицах.....	18
2.3.4. Приближенное приведение в относительных единицах.....	18
2.4. Преобразование схем.....	19
3. ПРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС В ПРОСТЕЙШЕЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ, ПИТАЕМОЙ ОТ ИСТОЧНИКА НЕОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ	23
3.1. Трехфазное короткое замыкание (КЗ) в неразветвленной цепи.....	24
4. НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КЗ	31
4.2. Параметры двигателей и обобщенной нагрузки в начальный момент времени	
4.3. Практические рекомендации при расчете начальной периодической составляющей тока КЗ и ударного тока.....	39
4.3.1. Определение эквивалентной электромагнитной постоянной Времени цепи короткого замыкания.....	41
5. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ПРОСТЕЙШЕЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ, ПИТАЕМОЙ ОТ ГЕНЕРАТОРА ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ.....	43
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ	44

ВВЕДЕНИЕ

Развитие электроэнергетики неразрывно связано с формированием и совершенствованием Единой Электроэнергетической системы. Вообще под энергетической системой понимается совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической энергии и теплоты при общем управлении этим режимом.

Электроэнергетической системой называется электрическая часть энергосистемы и питающиеся от нее приемники электрической энергии, объединенные общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии [1].

Интенсификация производства энергии и более полное использование оборудования требуют решения сложных проблем в управлении переходными процессами. Надежность электроснабжения потребителей может быть достигнута только лишь при соответствующем уровне управляемости переходными процессами и "живучести" электрической системы.

Изменение энергетического состояния электроэнергетической системы сопровождается переходным процессом, т.е. процессом перехода от одного установившегося режима к другому.

Причинами переходных процессов могут быть:

- 1) изменения схем электрических соединений;
- 2) коммутация электродвигателей и других электроприемников;
- 3) короткие замыкания;
- 4) форсировка возбуждения синхронных машин;
- 5) несинхронное включение синхронных машин;
- 6) грозовые явления.

В курсе "Переходные процессы в системах электроснабжения" изучаются в основном переходные процессы, связанные с короткими замыканиями и устойчивостью работы электроэнергетической системы в целом. При любом переходном процессе происходит изменение электромагнитного состояния элементов системы и нарушение баланса между механическим моментом на валу каждой вращающейся машины и электромагнитным моментом, в результате чего начинают изменяться скорости вращения машин. Таким образом, переходной процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в электроэнергетической системе. Благодаря довольно большой механической инерции вращающихся частей машин, начальная стадия переходного процесса характеризуется электромагнитными изменениями [2]. В соответствии с этим весь курс разбит на две части. В первой части рассматриваются электромагнитные переходные процессы, а во второй - совместно электромагнитные и механические, которые называются электромеханическими переходными процессами.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

1.1. Основные определения

Из всего многообразия электромагнитных переходных процессов в электроэнергетической системе наиболее распространенными являются процессы, вызванные [2]:

- 1) включением и отключением (коммутацией) двигателей и других приемников электрической энергии;
- 2) коротким замыканием (КЗ) в системе;
- 3) повторным включением и отключением короткозамкнутой цепи (применением автоматического повторного включения);
- 4) возникновением местной несимметрии в системе (например, отключение или обрыв одной фазы линии электропередачи);
- 5) действием форсировки возбуждения синхронных машин;
- 6) несинхронное включение синхронных машин.

Наиболее тяжелый переходный процесс возникает при КЗ.

Коротким замыканием называют всякое, не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в системах с глухозаземленными или эффективно заземленными нейтралью - также замыкание одной или нескольких фаз на землю (или на нулевой провод).

В системе с изолированными нейтралью замыкание одной фазы на землю называют однофазным замыканием на землю (ОЗЗ). При этом виде повреждения протекание тока обусловлено емкостными и активными параметрами изоляции фаз относительно земли. Данный вопрос будет подробно рассмотрен в разделе "Замыкания в электрических сетях 6...35 кВ".

При возникновении КЗ в электроэнергетической системе сопротивление цепи уменьшается (степень уменьшения зависит от положения точки КЗ в системе), что приводит к увеличению токов по сравнению с токами нормального режима работы. В свою очередь это вызывает снижение напряжений в системе, которое особенно велико вблизи места КЗ (при металлическом КЗ напряжение в точке короткого замыкания снижается до нуля).

Обычно в месте КЗ образуется переходное сопротивление, состоящее, в основном, из сопротивления возникшей электрической дуги. Когда токи КЗ оставляют сотни ампер и более, сопротивление дуги приблизительно постоянно и по своему характеру почти чисто активное. С уменьшением тока и увеличением длины дуги ее сопротивление увеличивается. Последнее имеет место в течение переходного процесса.

В ряде случаев переходные сопротивления могут быть очень малые и в практических расчетах ими можно пренебречь. Такие замыкания называются металлическими. Далее для упрощения анализа и выводов мы будем рассматривать только металлические КЗ.

В трехфазных системах с глухозаземленной и эффективно заземленной нейтралями различают следующие основные виды КЗ в одной точке:

а) трехфазное; б) двухфазное; в) двухфазное на землю, т.е. замыкание между двумя фазами с одновременным замыканием той же точки на землю; г) однофазное.

При трехфазном КЗ все фазы электрической сети оказываются в одинаковых условиях, поэтому его называют симметричным. При других видах КЗ фазы сети находятся в разных условиях и поэтому векторные диаграммы токов и напряжений искажены. Такие КЗ называют несимметричными.

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

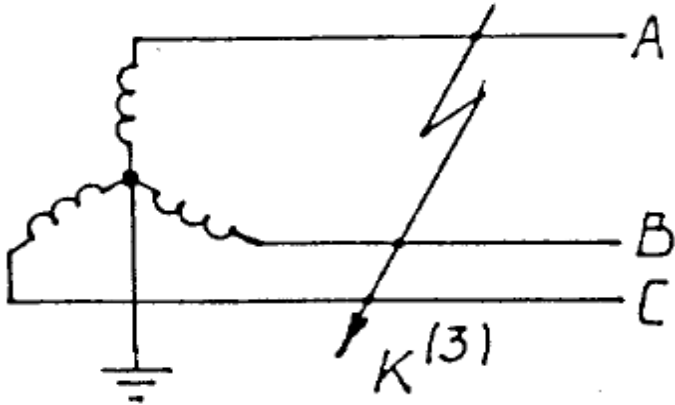
Нарушение симметрии какого-либо промежуточного элемента трехфазной цепи (например, отключение одной фазы линии электропередачи) называют продольной несимметрией.

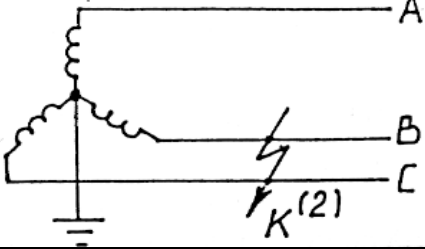
Возможны случаи, когда одновременно возникает несколько несимметрий одного или разного вида. Так, например, при обрыве провода воздушной линии один его конец, расположенный вблизи к точке подвеса, остаётся изолированным, а другой, упав на землю, образует однофазное КЗ. Здесь одновременно возникает продольная и поперечная несимметрия. Такие виды повреждений называют сложными.

Многолетняя аварийная статистика по электроэнергетическим системам показывает, что в системах с глухозаземленными нейтралями относительная вероятность различных основных видов КЗ характеризуется примерными данными, приведенными в табл. 1.1 [2].

Таблица 1.1

Относительная вероятность возникновения основных видов короткого замыкания

Вид КЗ	Принципиальная схема и буквенное обозначение вида КЗ	Относительная вероятность КЗ, %
Трехфазное		5

Вид КЗ	Принципиальная схема и буквенное обозначение вида КЗ	Относительная вероятность КЗ, %
Двухфазное		10
Двухфазное на землю		20
Однофазное		65

Как видно из табл. 1.1, подавляющее число КЗ связано с замыканием на землю. Трехфазные КЗ случаются крайне редко, но его величину необходимо знать, т.к. часто бывает, что величина тока КЗ при $K^{(3)}$ значительно больше, чем при других видах КЗ. В этом случае по данному виду КЗ будут проверяться коммутационные аппараты, токоведущие части, разрядники, заземляющие устройства и т.д.

1.2. Причины и последствия коротких замыканий

Относительная аварийность отдельных элементов электроэнергетических систем характеризуется данными табл.1.2 (данные за 1983 г.) [3].

Таблица 1.2

Относительная аварийность отдельных элементов

Элемент системы	Относительная аварийность, %
Электрические сети (линии и подстанции)	47
Силовая часть электростанций	26,2
Электрическая часть электростанций	19,1
Тепловые сети	7,7

Из этих данных видно, что большая часть повреждений возникает в электрических сетях. Их причиной в большинстве случаев являются различные виды КЗ.

Причинами КЗ обычно является нарушение изоляции, вызванное:

- 1) перенапряжениями (особенно в сетях с изолированной нейтралью);
- 2) прямыми ударами молний;
- 3) старением изоляции;
- 4) механическими повреждениями;
- 5) набросами посторонних тел, проездом под линиями негабаритных механизмов;
- 6) неудовлетворительным обслуживанием оборудования.

Часто причиной повреждений в электрической части электроустановок, сопровождающихся КЗ, являются неправильные действия обслуживающего персонала, например, ошибочные отключения разъединителем цепи с током, включение разъединителя на короткую, ошибочные действия при переключениях в главных схемах и схемах релейной защиты и автоматики. Такие действия обуславливают до 70% случаев всех отказов, возникших по вине обслуживающего персонала электроустановок [3].

Последствия КЗ бывают всевозможными:

- а) механическое и термическое повреждения электрооборудования;
- б) снижение уровня напряжения в сети, ведущее к уменьшению вращающего момента электродвигателей, их торможению, снижению производительности или даже к лавинообразному снижению напряжения по всей электроэнергетической системе;
- в) выпадение из синхронной работы отдельных генераторов, возникновение системных аварий;
- г) поражение людей электрическим током;
- д) возгорания в электроустановках;
- е) электромагнитное влияние на линии связи и системы железнодорожных блокировок и т.п.

В настоящее время при установке в энергосистемах мощных генераторов, трансформаторов и двигателей проблема правильного расчета токов КЗ становится еще более актуальной. Возникает вопрос координации уровней токов КЗ на электростанциях и в электрических сетях, т.е. вопрос стратегии построения сетей энергосистем на перспективу и согласования параметров электрооборудования и уровней токов КЗ в сетях различного напряжения.

1.3. Назначения расчетов и требования к их точности

При проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем требуется предварительно произвести ряд расчетов, среди которых значительное ме-

сто занимают расчеты электромагнитных переходных процессов и, в частности, коротких замыканий.

Под расчетом электромагнитного переходного процесса понимают вычисление токов и напряжений в рассматриваемой схеме при заданных, так называемых, расчетных условиях. В зависимости от назначения расчета указанные величины находят либо для заданного момента времени, либо вычисляют их изменение в течение всего переходного процесса. При этом расчеты проводятся для одной или нескольких ветвей и точек схемы.

Расчеты токов КЗ необходимы для:

- 1) сопоставления, оценки и выбора главных схем электрических соединений электростанций, подстанций, схем электроснабжения предприятий;
- 2) выбора электрических аппаратов;
- 3) проектирования и настройки устройств релейной защиты и автоматики;
- 4) определения числа заземленных нейтралей и их размещения в системе;
- 5) проектирования заземляющих устройств;
- 6) оценки поведения потребителей при аварийных условиях, определения допустимости того или иного режима;
- 7) выбора разрядников;
- 8) определения влияния токов КЗ на линии связи;
- 9) анализа устойчивости работы энергосистем и происшедших аварий.

Здесь перечислены далеко не все задачи, для практического решения которых производятся такие расчеты.

Точность расчетов зависит от учета конкретных условий рассматриваемого переходного процесса. Так, например, благодаря тому, что интервалы между номинальными параметрами электрических аппаратов в отношении их устойчивости к токам КЗ достаточно большие, точность расчета для выбора таких аппаратов может быть невелика (можно применять приближенное приведение параметров элементов электроэнергетической системы к базисной ступени напряжения). А вот точность расчета для цепей релейной защиты и автоматики должна быть значительно выше (обычно применяется точное приведение к базисной ступени напряжения).

Наименьшие требования к точности расчетов предъявляются для целей анализа аварий [2].

2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ЛЮБОГО ВИДА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

2.1. Основные допущения

Расчет электромагнитного переходного процесса в крупной электрической системе с учетом всех имеющихся условий и факторов очень сложен и практически невыполним [2]. С целью упрощения и практического решения задачи

вводят ряд допущений. Количество допущений зависит от характера и постановки задачи. Допущения, принятые при решении одной задачи, могут быть непригодны при решении другой. Таким образом, важным моментом является принятие тех или иных допущений при расчете переходных процессов.

При расчете токов КЗ принимают следующие допущения:

1. В процессе КЗ все генераторы вращаются синхронно и сдвига между векторами их ЭДС нет. Такое допущение дает малую погрешность при длительности КЗ до 0,5 с, так как при длительности КЗ 0...0,5 с переходный процесс можно считать чисто электромагнитным. При большей длительности расчёт КЗ необходимо вести как электромеханический. Неучет механического состояния вращающихся частей генераторов, электродвигателей в этом случае может привести к грубым ошибкам.

2. Все магнитные системы ненасыщены. При этом параметры схемы будут линейными.

3. Приближенный учет нагрузок. В зависимости от момента переходного процесса нагрузку приближенно представляют в виде постоянного индуктивного сопротивления.

4. Не учитываются токи намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов.

5. Активные сопротивления элементов схемы учитываются только при определении степени затухания апериодической составляющей тока КЗ в электрических сетях выше 1 кВ.

6. Не учитывается распределенная емкость линий электропередач (за исключением линий дальних электропередач и линий, работающих в системе с изолированной нейтралью трансформаторов).

7. Симметричность параметров всех элементов электроэнергетической системы по фазам.

8. Ротор каждого генератора симметричен, т.е. параметры генератора по продольной и поперечной осям одинаковы.

Указанные допущения приводят к погрешности расчета, которая обычно не превышает 5% [3].

2.2. Понятие о расчетных условиях. Составление схемы замещения

В зависимости от поставленной цели и назначения расчета переходного процесса принимаются расчетные условия. Обоснование расчетных условий при решении конкретных технических задач является одним из самых важных вопросов, решаемых после постановки задачи.

Так, например, для выбора выключателя по условиям его работы при КЗ должны быть определены наибольшие возможные величины токов КЗ. В этом случае исходят из предположения, что КЗ происходит в такой схеме, когда включено наибольшее число генераторов, трансформаторов, линий электропере-

дач, т.е. имеется наибольшее число параллельных ветвей. Точка расчета КЗ должна быть на выводах выключателя, короткое замыкание - металлическое.

Расчет вида КЗ на выводах выключателя зависит от режима нейтрали силовых трансформаторов той ступени напряжения, где находится выключатель. Если выключатель находится на ступени напряжения 6, 10, 35 кВ, то рассчитываются $K^{(2)}$ и $K^{(3)}$, а в остальных случаях - $K^{(1)}$, $K^{(2)}$, $K^{(3)}$.

За расчетный принимают тот вид КЗ, при котором будет наибольшая величина тока КЗ. Кроме названных, определяются расчетное время размыкания контактов выключателя и количество производимых им циклов "включение - отключение", т.е. расчетные условия для выбора выключателя.

Большое разнообразие расчетных условий встречается при выполнении расчетов для выбора и настройки устройств релейной защиты и автоматики. К ним относятся исходные предшествующие режимы заданной системы, число и расположение заземленных нейтралей, виды КЗ, последовательность отключения заданного участка и т.п.

Для выбора трубчатого разрядника требуется знать наибольшую и наименьшую величины токов КЗ. Для расчета наибольшей величины тока КЗ принимаются такие же расчетные условия, как и при выборе выключателя, а для расчета наименьшей - необходимы расчетные условия прямо противоположные тем, что используются при выборе выключателя.

Приведенные примеры показывают как велико разнообразие расчетных условий, от правильного обоснования параметров которых зависят надежность работы схемы, коммутационной и защитной аппаратуры, устойчивость работы генераторов и нагрузок и т.д.

Допустим, задана электроэнергетическая система, приведенная на рис.2.1.

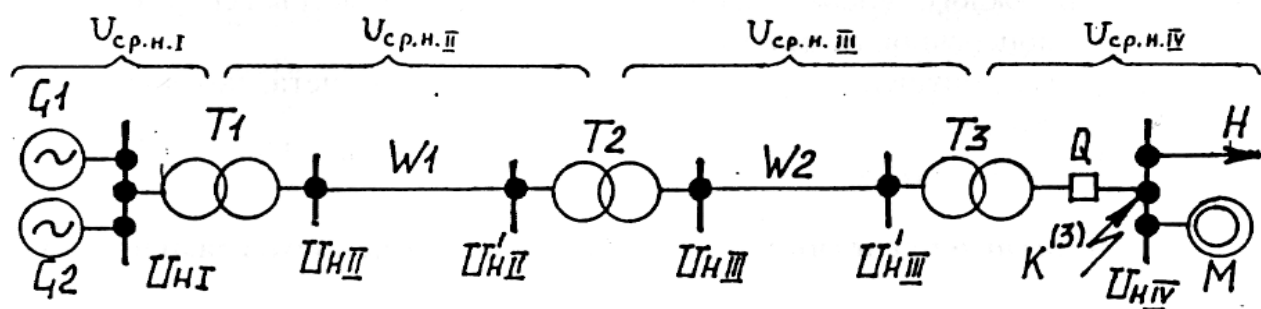


Рис. 2.1. Схема электрической системы:

G_1, G_2 - синхронные генераторы; H - обобщенная нагрузка; M - мощный асинхронный двигатель

Необходимо рассчитать ток КЗ для выбора выключателя на момент времени $t = 0$. Для этого должны быть включены параллельные связи, а точка КЗ должна быть на выводах выключателя.

Все трансформаторные магнитные связи в схеме замещения заменяются электрическими, т.е. все параметры элементов схемы замещения должны быть приведены к одной, базисной ступени напряжения. Методы приведения к базисной ступени напряжения рассматриваются далее.

Расчетная схема замещения для выбора выключателя Q приведена на рис. 2.2.

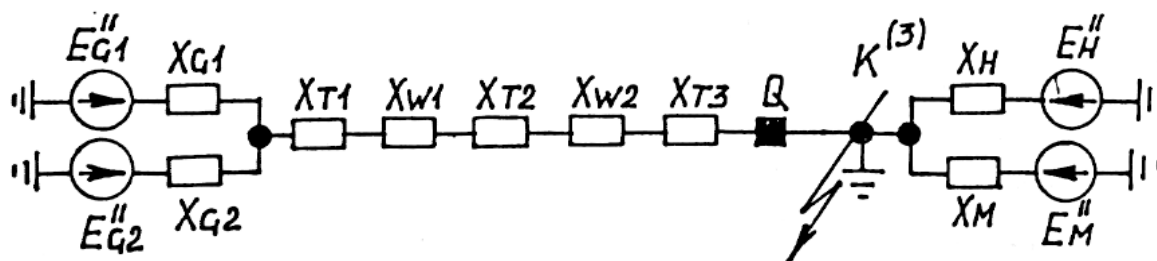


Рис. 2.2. Расчетная схема замещения

При составлении схемы замещения сопротивления шин и переходные сопротивления контактов выключателей не учитываются (в цепях выше 1 кВ). В точке металлического трехфазного КЗ фазные напряжения равны нулю (благодаря равенству сопротивлений и ЭДС по фазам). Для составления схемы замещения необходимо знать следующие исходные параметры элементов:

Генераторы

$x_{d*}(H)$ - сверхпереходное сопротивление генератора по продольной оси, о.е.;

S_H - номинальная мощность, МВ·А;

U_H - номинальное напряжение, кВ;

$\cos \varphi$ - коэффициент мощности в предшествующем режиме.

Соседняя энергосистема

S_K - мощность КЗ на шинах энергосистемы, МВ·А;

$x_{c*}(H)$ - сопротивление до шины энергосистемы, о.е.;

S_H - номинальная суммарная мощность источников энергосистемы, МВ·А.

Трансформаторы

U_K - напряжение КЗ для двухобмоточного трансформатора, % (для трехобмоточного $U_{K\ B-H}$; $U_{K\ B-C}$; $U_{K\ C-H}$);

S_H - номинальная мощность, МВ·А;

U_{Hj} - номинальное напряжение обмоток, кВ.

Реакторы

$x_{p*(n)}$ или $x_{p(n)}$ - сопротивление реактора, выраженное в о.е., приведенное к номинальным условиям, или то же, но выраженное в именованных единицах при номинальных условиях.

Линии электропередач

$x_{уд}$ - удельное сопротивление, Ом/км;

L - длина линии, км.

Двигатели

P_n - номинальная мощность, МВт;

U_n - номинальное напряжение, кВ;

$\cos \varphi$ - коэффициент мощности;

$E_{m*(n)}''$ - сверхпереходная ЭДС, о.е. (для асинхронных двигателей

$E_m'' = 0,85 - 0,9$ о.е., для синхронных - $E_m'' = 1,1$ о.е.);

$x_{m*(n)}'' = 0,2$ о.е. - сверхпереходное сопротивление двигателя.

Обобщенная нагрузка

$E_{n*(n)}'' = 0,85$ о.е. - сверхпереходная ЭДС нагрузки;

S_n - номинальная (расчетная) мощность нагрузки, МВ·А;

$x_{n*(n)}'' = 0,35$ о.е. - сверхпереходное сопротивление обобщенной нагрузки.

Все вращающиеся машины, в том числе и обобщенная нагрузка, характеризуются на момент времени КЗ ($t=0$) сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями. Как видно из приведенных исходных параметров элементов, они выражаются в именованных единицах (при номинальных параметрах указывается индекс "н" в скобках) либо в относительных, приведенных к номинальным условиям (внизу условного буквенного обозначения элемента дополнительно ставится звездочка "*"). В дальнейшем эти индексы будут опускаться. После того, как приведенные данные будут выписаны, начинают расчет сопротивлений и ЭДС в именованных единицах при номинальных условиях, т.е. расчёт сопротивлений (Ом) и ЭДС (кВ) на номинальных напряжениях по следующим формулам:

$$E_{(n)}'' = E_{*(n)}'' U_n, \text{ кВ};$$

$$x_{T(n)} = U_K / 100 \cdot U_n / S_n, \text{ Ом},$$

где U_n - номинальное напряжение той обмотки, которая находится ближе к базисной ступени напряжения, кВ.

$$E_{G(n)}'' = E_{*(n)}'' U_n \approx (1 + x_{d*(n)}'' \sin \varphi_0) U_n, \text{ кВ};$$

$$x_{c(n)} = \frac{U_{н.с}^2}{S_K} \quad \text{или} \quad x_{c(n)} = x_{c*(n)}'' \cdot \frac{U_{н.с}^2}{S_n}, \text{ Ом},$$

где $U_{н.с}$ - номинальное напряжение на шинах энергосистемы, кВ.

$$x_{G(n)} = x_{d^{*(n)}}'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n}, \text{ Ом};$$

$$x_{M(n)} = x_{M^{*(n)}} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}.$$

На этом завершается составление расчетной схемы замещения и подготовка параметров элементов для приведения их к основной, базисной ступени напряжения.

Общие формулы пересчета параметров элементов из относительных единиц при номинальных условиях в именованные при номинальном напряжении:

$$E_{j(n)}'' = E_{j^{*(n)}}'' \cdot U_{nj}, \text{ кВ},$$

$$x_{j(n)} = x_{j^{*(n)}} Z_{nj} = x_{j^{*(n)}} \cdot \frac{U_{nj}^2}{S_{nj}}, \text{ Ом},$$

где $E_{j^{*(n)}}''$, $x_{j^{*(n)}}$ - ЭДС и сопротивление элемента, выраженные в относительных единицах (*) на номинальном напряжении (н);

Z_{nj} - номинальное сопротивление элемента, Ом;

$$x_{w(n)} = x_{уд} \cdot 1, \text{ Ом}.$$

2.3. Методы приведения параметров элементов, выраженных в именованных единицах при номинальных условиях, к базисной ступени напряжения

Из рис. 2.1 и 2.2 видно, что все параметры (ЭДС и сопротивления) должны быть приведены к одной ступени напряжения, которая называется базисной. Выбор базисной ступени напряжения зависит от цели расчета. Если поставлена задача рассчитать ток, который будет протекать, например, по линии W1 при КЗ в рассматриваемой точке (см. рис. 2.1), то за базисное напряжение удобнее брать $U_{ср.нII}$, а если же стоит задача: рассчитать ток КЗ для выбора выключателя Q, то $U_6 = U_{ср.нIV}$.

За базисные величины средних номинальных напряжений принимают следующие: для сетей напряжением до 220 кВ 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 20; 37; 115; 154; 230 кВ ($U_{ср.н} = 1,05 \cdot U_{н.сети}$), для сетей 330 кВ и выше - $U_{ср.н} = 1,025 \cdot U_{н.сети}$ (340; 515; 770 кВ).

При приведении параметров элементов к базисной ступени напряжения может применяться один из следующих методов:

- 1) приближенного приведения (ПП);
- 2) точного приведения (ТП).

Параметры элементов могут выражаться при этом в именованных (ИЕ) или относительных единицах (ОЕ). Эти методы можно показать в виде схемы приведенной на рис. 2.3.

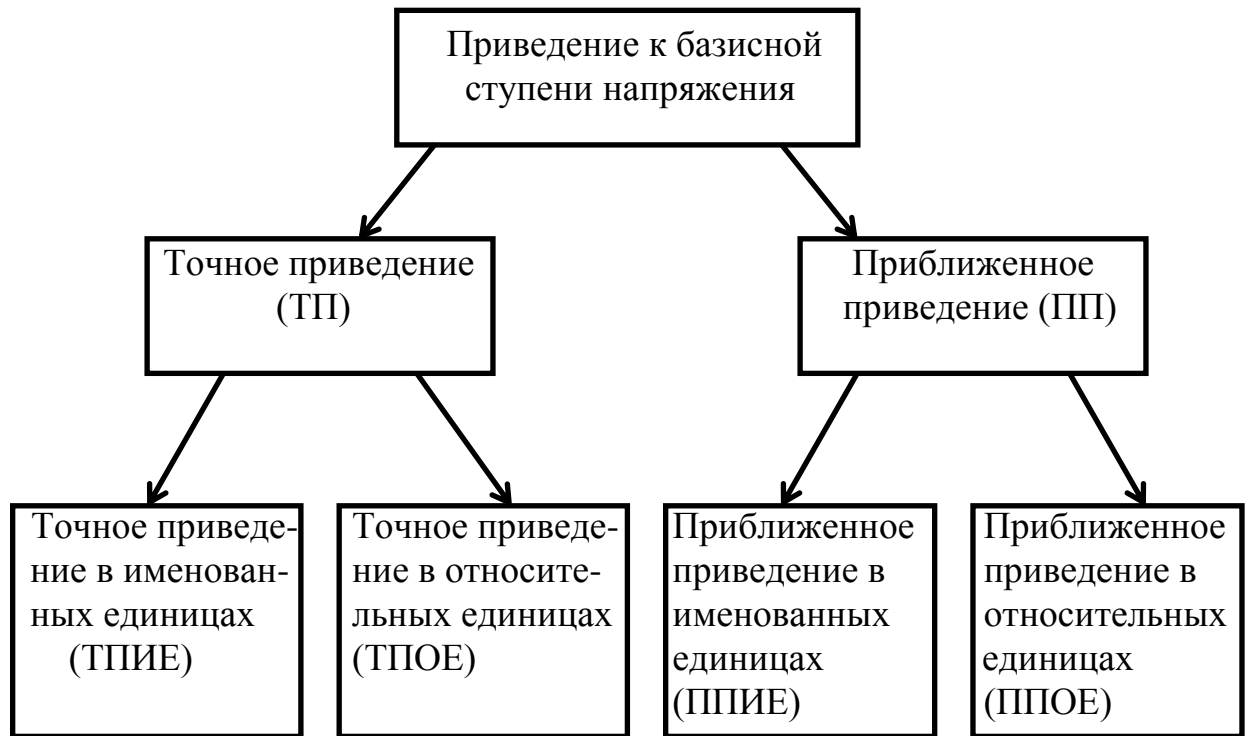


Рис. 2.3. Методы приведения к базисной ступени напряжения

Обычно при расчетах, используемых для решения технических задач по релейной защите и автоматике используется точное приведение в именованных единицах, а для выбора выключателей - ППОЕ. Рассмотрим эти методы.

2.3.1. Точное приведение в именованных единицах

За базисную ступень напряжения примем четвертую ступень $U_6 = U_{\text{ср.нIV}}$ (см. рис. 2.1).

$$E_{G(6)}'' = (1 + x_d'' \sin \varphi_0) U_H \overset{\text{Генераторы}}{\left(\frac{U_{H.II}}{U_{H.I}} \right) \cdot \left(\frac{U_{H.III}}{U_{H.II}} \right) \cdot \left(\frac{U_{H.IV}}{U_{H.III}} \right)} = (1 + x_d'' \sin \varphi) U_H \cdot k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{T3},$$

где $U_{H.I}, U_{H.II}, U_{H.II}', U_{H.III}, U_{H.III}', U_{H.IV}$ - номинальные напряжения при холостом ходе трансформаторов, кВ;

k_{T1}, k_{T2}, k_{T3} - коэффициенты трансформации соответствующих трансформаторов.

$$x_{G(6)} = x_{G(H)} \cdot k_{T1}^2 \cdot k_{T2}^2 \cdot k_{T3}^2 = x_{d*(H)}'' \frac{U_H^2}{S_H} \cdot k_{T1}^2 \cdot k_{T2}^2 \cdot k_{T3}^2, \text{ Ом.}$$

Трансформаторы

$$X_{T1(6)} = X_{T1(H)} \cdot K_{T1}^2 \cdot K_{T2}^2 \cdot K_{T3}^2 = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_{HII}^2}{S_H} \cdot K_{T2}^2 \cdot K_{T3}^2, \text{ Ом};$$

$$X_{T2(6)} = X_{T2(H)} \cdot K_{T3}^2 = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_{HIII}^2}{S_H} \cdot K_{T3}^2, \text{ Ом};$$

$$X_{T3(6)} = X_{T3(H)} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_{HIV}^2}{S_H}, \text{ Ом}.$$

Воздушные линии

$$X_{W1(6)} = X_{W1(H)} \cdot K_{T2}^2 \cdot K_{T3}^2 = X_{уд} \cdot 1 \cdot K_{T2}^2 \cdot K_{T3}^2, \text{ Ом};$$

$$X_{W2(6)} = X_{W2(H)} \cdot K_{T3}^2 = X_{уд} \cdot 1 \cdot K_{T3}^2, \text{ Ом}.$$

Обобщенная нагрузка

$$E''_{H(6)} = E''_{H^*(H)} \cdot U_{HIV} = 0,85 \cdot U_{HIV}, \text{ кВ};$$

$$X_{H(6)} = X''_{H^*(H)} \cdot \frac{U_{HIV}^2}{S_H} = 0,35 \cdot \frac{U_{HIV}^2}{S_H}, \text{ Ом}.$$

Асинхронный двигатель

$$X_{M(6)} = X''_{M^*(H)} \cdot \frac{U_{HIV}^2}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{U_{HIV}^2}{S_H}, \text{ Ом};$$

$$E''_{M(6)} = E''_{M^*(H)} \cdot U_{HIV} = 0,85 \cdot U_{HIV}, \text{ кВ}.$$

В дальнейшем индекс, указывающий на величину, приведенную к базисному напряжению, опустим.

Общие формулы метода приведения ТПН к базисной ступени напряжения:

$$E''_{j(6)} = E''_{j(H)} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n, \text{ кВ};$$

$$X_{j(6)} = X_{j(H)} \cdot K_1^2 \cdot K_2^2 \cdot \dots \cdot K_n^2, \text{ Ом};$$

$$I_{j(6)} = I_{j(H)} \cdot \frac{1}{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n}, \text{ А};$$

$$S_{j(6)} = S_j, \text{ МВА},$$

где $I_{j(H)}$ - ток, протекающий по j-му элементу при номинальном напряжении, А;

$K_1, K_2 \dots K_n$ - коэффициенты трансформации трансформаторов, расположенных между базисной ступенью напряжения и ступенью, где находится элемент, подлежащий приведению;

$S_{j(б)}$ - полная мощность, протекающая по j-му элементу, приведенная к базисной ступени напряжения.

Под коэффициентом трансформации каждого трансформатора в дальнейшем будем понимать отношение линейного напряжения холостого хода его обмотки, обращенной в сторону базисной ступени напряжения, к аналогичному напряжению его другой обмотки, расположенной ближе к ступени, где находится элемент, подлежащий приведению.

2.3.2. Приближенное приведение в именованных единицах

Если использовать в коэффициентах трансформации средние номинальные напряжения ступеней трансформации, то получим следующие выражения для приближенного приведения в именованных единицах:

$$E''_{G1(б)} = E''_{G(н)} \cdot \frac{U_{ср.нIV}}{U_{ср.нI}}, \text{ кВ};$$

$$X_{G(б)} = X_{G(н)} \cdot \frac{U_{ср.нIV}^2}{U_{ср.нI}^2}, \text{ Ом};$$

$$X_{T1(б)} = X_{T1(н)} \cdot \frac{U_{ср.нIV}^2}{U_{ср.нII}^2}, \text{ Ом};$$

$$X_{T2(б)} = X_{T2(н)} \cdot \frac{U_{ср.нIV}^2}{U_{ср.нIII}^2}, \text{ Ом};$$

$$X_{T3(б)} = X_{T3(н)}, \text{ Ом};$$

$$\lambda_{w1(\dot{x})} = x_{-лб} \cdot L \cdot \frac{U_{-р.IV}^2}{U_{-р.II}^2}, \text{ Ом};$$

$$\lambda_{w2(\dot{x})} = x_{-лб} \cdot L \cdot \frac{U_{-р.IV}^2}{U_{-р.III}^2}, \text{ Ом}.$$

Общие формулы:

$$E''_{j(б)} = E''_{j(н)} \cdot \frac{U_{б}}{U_{ср.н.j}}, \text{ кВ};$$

$$X_{j(б)} = X_{j(н)} \cdot \frac{U_{б}^2}{U_{ср.н.j}^2}, \text{ Ом}.$$

Иногда последние формулы еще упрощают, используя в выражениях расчета ЭДС и сопротивлений ($E''_{j(н)}$ и $X_{j(н)}$) вместо номинальных значений средние, т.е. $U_{н.j} = U_{ср.н.j}$.

2.3.3. Точное приведение в относительных единицах

При расчете в относительных единицах необходимо параметр, приведенный к базисной ступени напряжения, разделить на соответствующую базисную одноименную величину. Для этого необходимо выбрать базисную мощность S_6 . Величина базисной мощности выбирается кратная десяти: 10; 100; 1000 МВ·А. В общем случае величина базисной мощности может быть любой. После выбора базисной мощности определяется базисное сопротивление:

$$z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3} \cdot I_6} = \frac{U_6^2}{S_6}, \text{Ом.}$$

Формулы приведения в этом случае будут иметь следующий вид:

$$E_{G*(6)}'' = E_{G(6)}'' / U_6 = E_{*(H)}'' \cdot U_H \cdot k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{T3} / U_6, \text{о.е.};$$

$$x_{G*(6)} = x_{G(6)} / z_6 = x_{G(6)} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} = x_{d*(H)}'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot k_{T1}^2 \cdot k_{T2}^2 \cdot k_{T3}^2 \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \text{о.е.};$$

$$x_{T1*(6)} = x_{T1(6)} / z_6 = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_{H.II}^2}{S_H} \cdot k_{T2}^2 \cdot k_{T3}^2 \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \text{о.е.}.$$

Аналогично можно записать формулы для других элементов.

Общие формулы:

$$E_{j*(6)}'' = E_{j(6)}'' / U_6;$$

$$x_{j*(6)} = x_{j(6)} / z_6,$$

где $E_{j(6)}''$, $x_{j(6)}$ - соответственно ЭДС и сопротивление j -го элемента, приведенные к базисной ступени напряжения, и выраженные в именованных единицах.

2.3.4. Приближенное приведение в относительных единицах

При использовании этого вида приведения для упрощения принимают $U_H = U_{ср.н}$. Обычно этот вид приведения используется при расчете токов КЗ для выбора выключателей, т.е. когда не требуется особой точности.

Формулы приведения:

$$E_{G(6)} = E_{*(H)}'';$$

$$x_{G*(6)} = x_{d*(H)}'' \cdot \frac{U_{\text{ср.н.I}}^2}{S_H} \cdot \left(\frac{U_{\text{ср.н.II}}}{U_{\text{ср.н.I}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_{\text{ср.н.III}}}{U_{\text{ср.н.II}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_{\text{ср.н.IV}}}{U_{\text{ср.н.III}}} \right)^2 \cdot \frac{S_6}{U_6^2} =$$

$$= x_{d*(H)}'' \cdot \frac{S_6}{S_H}, \text{о.е.};$$

$$x_{T*(6)} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H}, \text{о.е.};$$

$$x_{H*(6)} = x_{H*(H)} \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,35 \cdot \frac{S_6}{S_H}, \text{о.е.};$$

$$x_{M*(6)} = x_{M*(H)}'' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{S_6}{S_H}, \text{о.е.};$$

$$x_{W*(6)} = x_{\text{уд}} \cdot 1 \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.н}}^2}, \text{о.е.},$$

где $U_{\text{ср.н.}}$ - среднее номинальное напряжение той ступени напряжения, где находится данная линия, кВ.

Общие формулы:

$$E_{j*(6)}'' = E_{j*(H)}'';$$

$$x_{j*(6)} = x_{j*(H)} \cdot \frac{S_6}{S_{H,j}};$$

$$x_{W*(6)} = x_{\text{уд}} \cdot 1 \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.н.W}}^2}.$$

2.4. Преобразование схем

В частном случае, когда схема замещения не содержит множество замкнутых контуров и в этой схеме имеется один или несколько источников с одинаковыми ЭДС, ее можно легко привести к простейшему виду (результатирующий (эквивалентный) источник ЭДС E_{Σ} - результирующее сопротивление x_{Σ} - точка КЗ), приведенному на рис. 2.4.

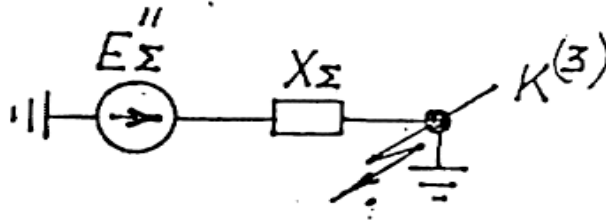


Рис. 2.4. Результирующая схема замещения, эквивалентная схеме, приведенной на рис. 2.2

Из этой схемы легко определить действующее значение периодической (вынужденной) составляющей тока трехфазного КЗ в нулевой момент времени:

$$I_{п(0)} = \frac{E''_{\Sigma}}{X_{\Sigma}}. \quad (2.1)$$

Схема на рис. 2.4 получается путем последовательного и параллельного сложения элементов.

Приведение более сложных схем к простейшему виду требуют дополнительных преобразований:

- 1) треугольника в звезду и наоборот;
- 2) многолучевой звезды в полный многоугольник;
- 3) "разрезание" треугольника с ЭДС, подключенной к вершине, по данному узлу;
- 4) замены нескольких генерирующих ветвей с разными по величине ЭДС, присоединенных к общему узлу, одной эквивалентной.

Разберем эти преобразования. При последовательном соединении n элементов эквивалентное сопротивление равно:

$$X_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n X_j. \quad (2.2)$$

При параллельном соединении n элементов:

$$X_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n y_j}. \quad (2.3)$$

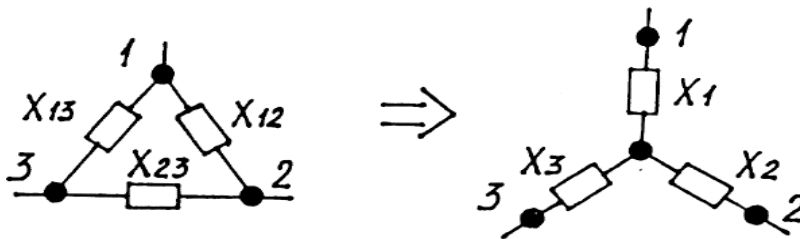


Рис. 2.5. Схемы преобразования из треугольника в эквивалентную звезду

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{x_{13} \cdot x_{12}}{x_{13} + x_{12} + x_{23}}; \\ x_2 &= \frac{x_{12} \cdot x_{23}}{x_{13} + x_{12} + x_{23}}; \\ x_3 &= \frac{x_{13} \cdot x_{23}}{x_{13} + x_{12} + x_{23}} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Если требуется обратное преобразование, то формулы будут следующие:

$$\left. \begin{aligned} x_{13} &= x_1 + x_3 + \frac{x_1 \cdot x_3}{x_2}; \\ x_{12} &= x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3}; \\ x_{23} &= x_2 + x_3 + \frac{x_2 \cdot x_3}{x_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

При преобразовании многолучевой звезды в эквивалентный полный многоугольник:

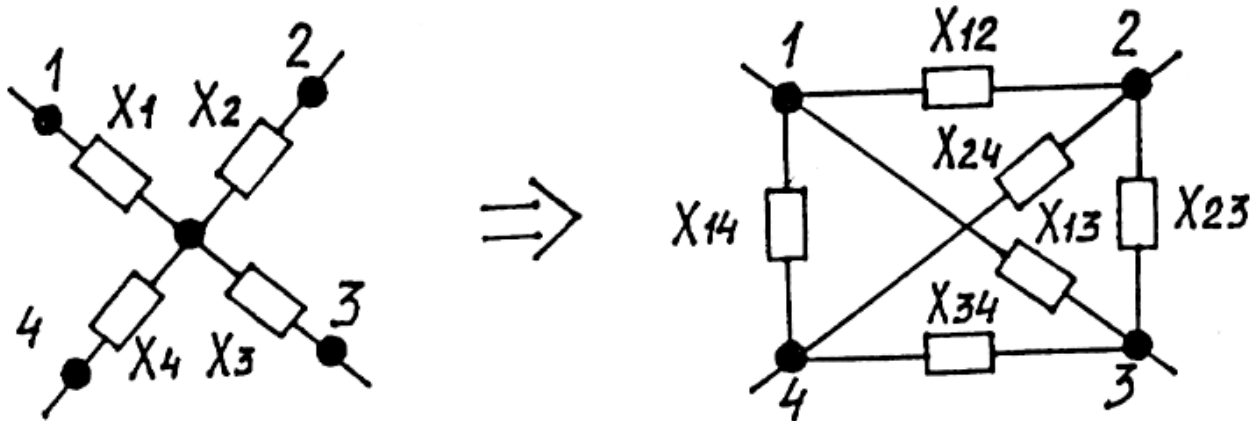


Рис. 2.6. Схемы преобразования из многолучевой звезды в эквивалентный полный многоугольник (с диагоналями)

$$x_{ij} = x_i \cdot x_j \sum_{k=1}^n y_k \quad (2.6)$$

Например, необходимо определить сопротивления x_{13} и x_{12} :

$$x_{13} = x_1 \cdot x_3 \cdot \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3} + \frac{1}{x_4} \right),$$

$$x_{12} = x_1 \cdot x_2 \cdot \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3} + \frac{1}{x_4} \right).$$

Таким образом определяются все сопротивления полного многоугольника.

Часто используется преобразование звезды с ЭДС в треугольник с последующим "разрезанием" узла (узлов) с ЭДС. Рассмотрим этот случай.

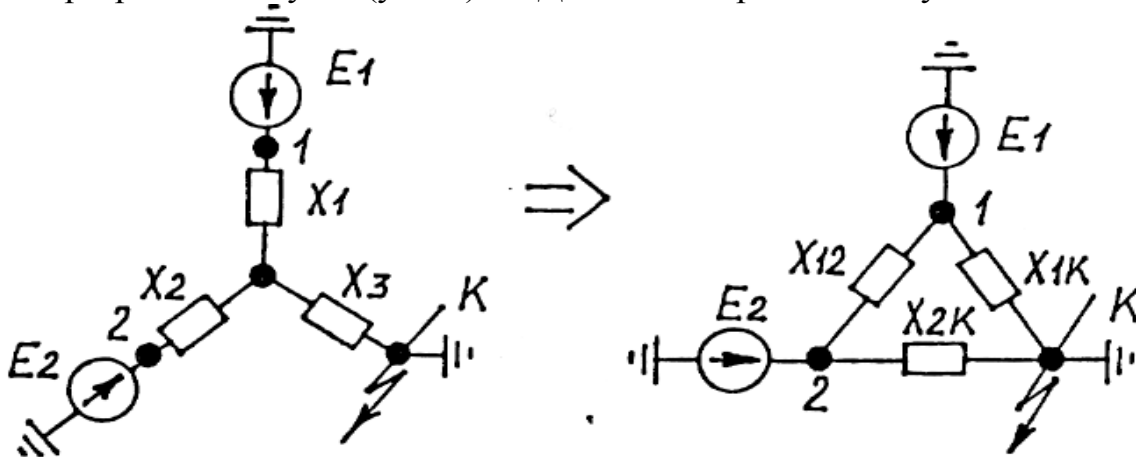


Рис. 2.7. Преобразование звезды в треугольник

После такого преобразования (см. рис. 2.7), "разрежем" по узлам 1 и 2 и получим схему (см. рис. 2.8).

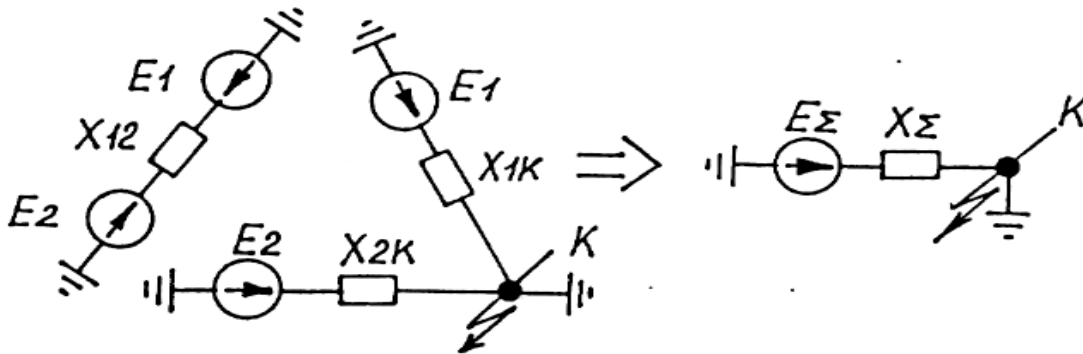


Рис. 2.8. Схема с "разрезанием" по узлам с ЭДС и последующим ее преобразованием к простейшему виду

Как видно из схемы, сопротивление x_{12} никак не будет влиять на величину тока $K3$. Схема замещения теперь преобразуется к простейшему виду путем замены двух генерирующих ветвей с разными по величинам ЭДС, присоединенных к общему узлу K , одной эквивалентной - по формуле:

$$E_{\Sigma} = E_{\vartheta} = x_{\Sigma} \cdot \left(\frac{E_1}{x_{1K}} + \frac{E_2}{x_{2K}} \right), \quad (2.7)$$

где x_{Σ} - результирующее (эквивалентное) сопротивление двух параллельных ветвей $x_{\Sigma} = x_{1K} \cdot x_{2K} / (x_{1K} + x_{2K})$.

Формулу (2.7) можно после преобразования записать (для двух параллельных ветвей):

$$E_{\Sigma} = \frac{E_1 \cdot x_2 + E_2 \cdot x_1}{x_1 + x_2}.$$

В общем виде при n параллельных ветвях выражение эквивалентной ЭДС запишется:

$$E_{\Sigma} = z_{\Sigma} \sum_{j=1}^n \frac{E_j}{z_j}, \quad (2.8)$$

где $z_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n y_j}$ - эквивалентное сопротивление параллельных ветвей.

Теперь преобразуем приведенную на рис. 2.9 схему замещения к простейшему виду, используя все рассмотренные виды преобразований (самостоятельно).

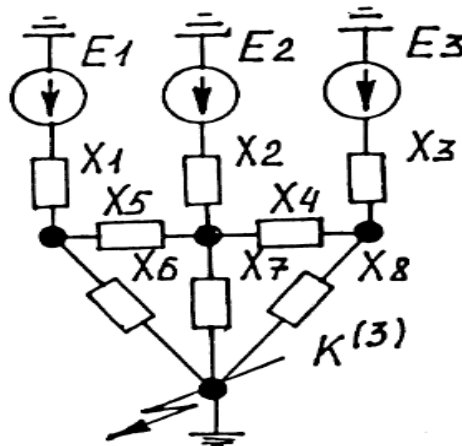


Рис. 2.9. Схема замещения, которую необходимо преобразовать к простейшему виду

3. ПРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС В ПРОСТЕЙШЕЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ, ПИТАЕМОЙ ОТ ИСТОЧНИКА НЕОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

Симметричную трехфазную цепь с активным и индуктивным сопротивлениями при отсутствии трансформаторных связей будем называть простейшей трехфазной цепью.

Электромагнитный переходной процесс в простейшей цепи рассмотрим для случая питания ее от источника бесконечной мощности. Под источником бесконечной мощности будем понимать такой, у которого собственное сопротивление равно нулю, а напряжение имеет постоянную амплитуду и частоту. Любые изменения в присоединенных цепях не влияют на работу такого источника. Практически это возможно, например, при КЗ в сетях, удаленных от электростанций крупных энергосистем (сети 6-10/0,4кВ).

3.1. Трехфазное короткое замыкание (КЗ) в неразветвленной цепи

Рассмотрим простейшую симметричную трехфазную цепь (рис.3.1). В такой цепи условно принято, что на ее левом от точки КЗ участке между фазами имеется взаимоиндукция "М", а на правом - нет. Цепь присоединена к источнику бесконечной мощности.

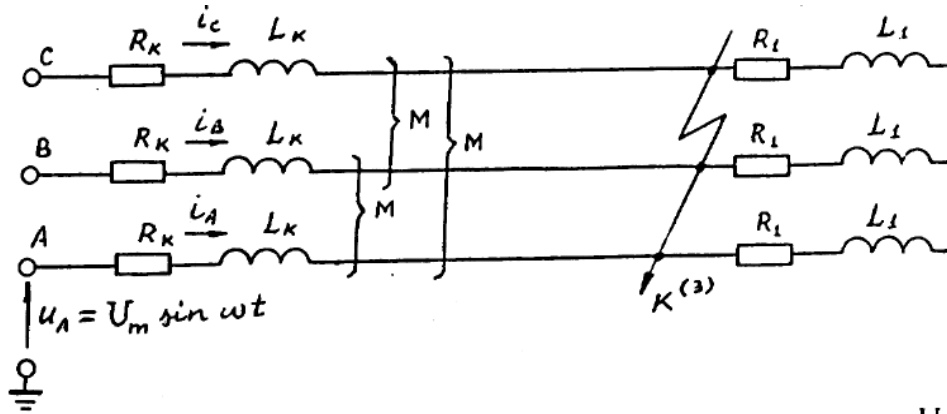


Рис.3.1. Простейшая трехфазная электрическая цепь, где $U_A = U_m \sin \omega t$, $U_B = U_m \sin(\omega t - 120^\circ)$, $U_C = U_m \sin(\omega t - 240^\circ)$ - мгновенные значения фазных напряжений источника питания

Рассмотрим векторную диаграмму токов и напряжений простейшей трехфазной цепи (рис.3.2). Пусть векторы \dot{U}_{mA} , \dot{U}_{mB} , \dot{U}_{mC} , \dot{I}_{mA} , \dot{I}_{mB} , \dot{I}_{mC} характеризуют предшествующий установившийся режим данной цепи. Вертикальная линия t-t является временной осью. Мгновенные значения отдельных величин определяются проекциями на эту ось соответствующих, вращающихся векторов. Момент возникновения КЗ будет фиксироваться значением угла α , который называется фазой включения между вектором напряжения фазы А и горизонтальной осью (см. рис. 3.2).

После возникновения короткого замыкания электрическая цепь (см. рис.3.1) распадается на два участка. Участок с R_1 и L_1 оказывается зашунтированным КЗ и ток на этом участке будет поддерживаться до тех пор, пока запасенная в индуктивности L_1 энергия магнитного поля не перейдет в тепло, поглощаемое активным сопротивлением R_1 .

Дифференциальное уравнение равновесия напряжений в каждой фазе этого участка:

$$0 = iR_1 + L_1 \frac{di}{dt}. \quad (3.1)$$

Его решение общеизвестно:

$$i = i_{(0)} e^{-\frac{t}{T_{a.1}}}. \quad (3.2)$$

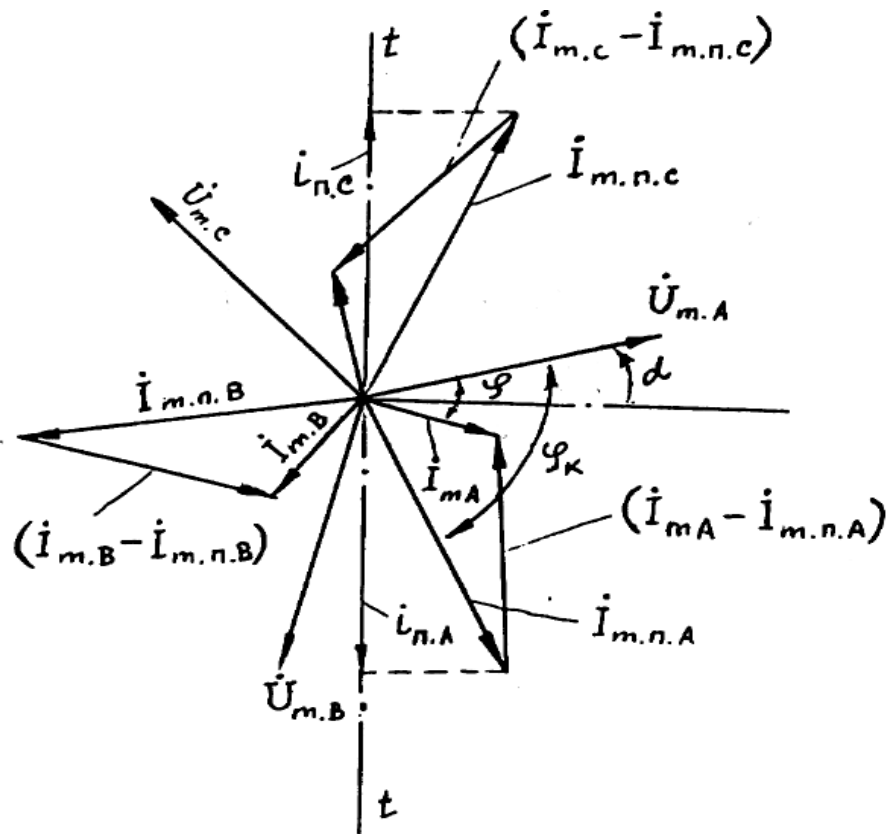


Рис. 3.2. Векторная диаграмма для начального момента трехфазного КЗ, где $i_{п.А}$, $i_{п.С}$ - мгновенные значения токов в соответствующих фазах

Уравнение (3.2) показывает, что в цепи имеется только свободный ток, который затухает по экспоненте с постоянной времени:

$$T_{a.1} = \frac{L_1}{R_1} = \frac{x_1}{\omega \cdot R_1}, \text{ с} \quad (3.3)$$

Начальное мгновенное значение свободного тока $i_{(0)}$ в каждой фазе зашунтированного участка цепи равно мгновенному значению тока предшествовавшего режима работы, т.к. в цепи с индуктивностью ток не может измениться скачком. Очевидно, что начальные мгновенные значения токов в фазах $i_{(0)}$ будут различны по величине, хотя их затухание происходит с одной и той же электромагнитной постоянной времени. В одной из фаз свободный ток может вообще отсутствовать, если в момент возникновения КЗ ток предшествующего режима проходил через нуль (в этом случае свободные токи в других фазах будут равные по величине, но противоположные по направлению).

На рис. 3.3 приведены кривые изменения фазных токов в зашунтированном участке с учетом того, что КЗ произошло в момент, приведенный на рис.3.2.

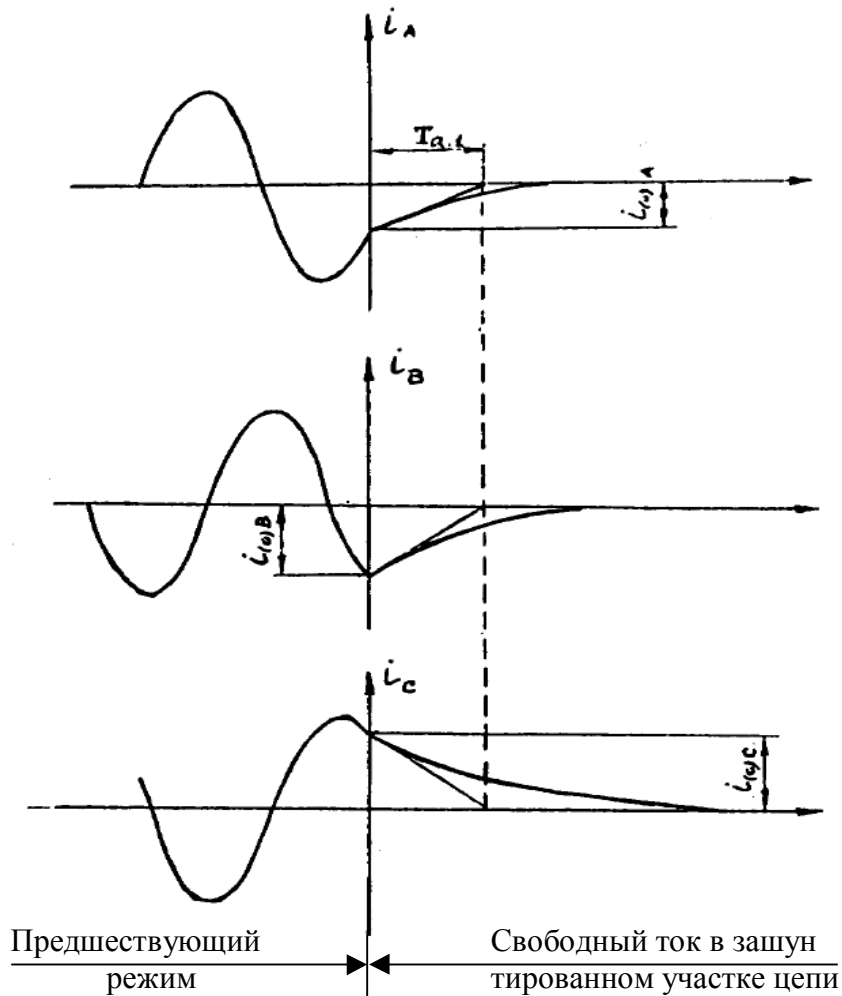


Рис.3.3. Осциллограмма токов предшествующего режима и зашунтированных коротким замыканием цепи

Перейдем теперь к участку цепи, который остался присоединенным к источнику бесконечной мощности. В этой цепи, кроме свободного тока, будет протекать принужденный ток, величина которого больше тока предшествующего режима и сдвиг по фазе между током и напряжением иной. Ток становится больше и сдвиг по фазе изменяется из-за того, что уменьшается величина полного сопротивления цепи и изменяется соотношение между индуктивным и активным сопротивлениями. Допустим, что векторы $\dot{I}_{м.п.А.}$, $\dot{I}_{м.п.В.}$, $\dot{I}_{м.п.С.}$ (см. рис. 3.2) характеризуют новый установившийся режим для данного участка цепи.

Дифференциальное уравнение равновесия напряжений для любой фазы, например, фазы А этого участка:

$$U_A = i_{A.к} R + L_{\kappa} \frac{di_{A.к}}{dt} + M \frac{di_{B.к}}{dt} + M \frac{di_{C.к}}{dt}. \quad (3.4)$$

Известно, что сумма мгновенных значений тока при симметричной нагрузке равна нулю. Тогда можно записать:

$$-i_{A.K} = (i_{B.K} + i_{C.K}). \quad (3.5)$$

С учетом выражения (3.5) уравнение (3.4) запишется в следующем виде:

$$U_A = i_{A.K} R_K + L'_K \frac{di_{A.K}}{dt}, \quad (3.6)$$

где $L'_K = (L_K - M)$ - результирующая индуктивность фазы, т.е. индуктивность с учетом влияния двух других фаз. Уравнение (3.6) для фаз В и С будет таким же, только с соответствующими индексами.

Решение уравнения (3.6) имеет вид:

$$i_K = \frac{U_m}{Z_K} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a(0)} e^{-\frac{t}{T_{a.K}}}, \quad (3.7)$$

где U_m - амплитудное значение напряжения на зажимах источника бесконечной мощности;

Z_K - полное сопротивление присоединенного к источнику участка цепи (цепь короткого замыкания);

φ_K - угол сдвига вектора тока относительно вектора напряжения источника (сдвиг по фазе);

$i_{a(0)}$ - начальное значение свободного тока;

$T_{a.K} = \frac{L'_K}{R_K}$ - электромагнитная постоянная времени цепи короткого замы-

кания.

Первый член правой части уравнения (3.7) представляет периодическую составляющую тока КЗ $i_{п}$, которая является принужденным током с постоянной амплитудой $I_{m.п} = U_m/Z_K$. Второй член представляет затухающий по экспоненте свободный ток (его называют апериодической составляющей тока КЗ). Начальное значение апериодической составляющей (для времени $t=0$) определяется из начальных условий, т.е. когда ток в цепи с индуктивностью не может измениться скачком и будет равен начальному значению предшествующего короткому замыканию режима:

$$i_{(0)} = i_{п(0)} + i_{a(0)} = \frac{U_m}{\sqrt{(R_K + R_1)^2 + (X_K + X_1)^2}} \cdot \sin(\alpha - \varphi). \quad (3.8)$$

После подстановки в выражение (3.8) формулы $i_{a(0)} = I_{m.п} \cdot \sin(\alpha - \varphi_K)$ получим:

$$i_{a(0)} = I_m \cdot \sin(\alpha - \varphi) - I_{m.п} \cdot \sin(\alpha - \varphi_K), \quad (3.9)$$

где $I_m = \frac{U_m}{\sqrt{(R_K + R_1)^2 + (X_K + X_1)^2}}$ - амплитудное значение тока предшествующего режима.

Поскольку мгновенные значения токов $i_{п(0)}$ и $i_{(0)}$ являются проекциями векторов $\dot{I}_{m.п}$ и \dot{I}_m на ось времени (см. рис. 3.2), то ток $i_{a(0)}$ также можно рассматри-

вать как проекцию вектора $(\dot{I}_m - \dot{I}_{m.п})$ на ту же ось времени. В зависимости от фазы включения α мгновенное значение апериодической составляющей тока КЗ $i_{a(0)}$ может изменяться от возможно максимальной величины, когда вектор $(\dot{I}_m - \dot{I}_{m.п})$ параллелен оси времени $t-t$, до нуля (когда этот вектор перпендикулярен к ней). В трехфазной системе такие частные условия могут быть только лишь в одной из фаз.

На рис. 3.4 представлена кривая изменения тока КЗ в фазе А рассматриваемого участка цепи (левого от точки КЗ) при трехфазном коротком замыкании. Таким образом, имея осциллограмму тока КЗ можно графически определить апериодическую и периодическую составляющие тока. Апериодическая составляющая тока КЗ определяется как средняя точка между огибающими тока КЗ. Например, для момента времени t_1 $i_{a,t1}$ будет равна отрезку MN. Отрезок FM равен отрезку ME. Для любого момента времени последнее равенство отрезков будет соблюдаться.

Как видно из рис. 3.4, чем больше начальное значение апериодической составляющей тока КЗ $i_{a(0)}$, тем больше смещение кривой полного тока КЗ i_k относительно оси времени. Апериодическую составляющую тока КЗ можно рассматривать как криволинейную ось симметрии полного тока КЗ, из которого ее легко выделить, проведя огибающие по положительным и отрицательным амплитудным значениям осциллограммы полного тока КЗ.

Из рис. 3.2 и формулы (3.9) следует, что в общем случае наибольшее начальное значение апериодической составляющей тока КЗ $i_{a(0)}$ определяется не только фазой включения α , сдвигом фаз φ и φ_k , но и током предшествующего режима I_m и периодической составляющей $I_{m.п}$. Так, например, при отсутствии тока предшествующего режима $I_m = 0$ величина $i_{a(0)}$ равна амплитуде периодической составляющей $I_{m.п}$ и достигнет своего максимума, если в момент КЗ вектор $I_{m.п}$ пройдет через свой положительный или отрицательный максимумы.

При какой же величине фазы включения α полный ток КЗ будет иметь наибольшее значение, если $I_m = 0$? Из выражений (3.7) и (3.9) и при отсутствии тока предшествующего режима ($I_m = 0$) будем иметь следующую формулу полного тока КЗ:

$$i_k = I_{m.п} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{t}{T_{a.к}}} \right]. \quad (3.10)$$

Из выражения (3.10) видно, что полный ток КЗ является функцией двух независимых переменных: времени t и фазы включения для какой-то определенной точки КЗ, т.е. когда φ_k является константой. Приравняв к нулю частные производные выражения (3.10) и совместно решив полученные два уравнения, найдем условие, при котором наступит максимум полного тока КЗ.

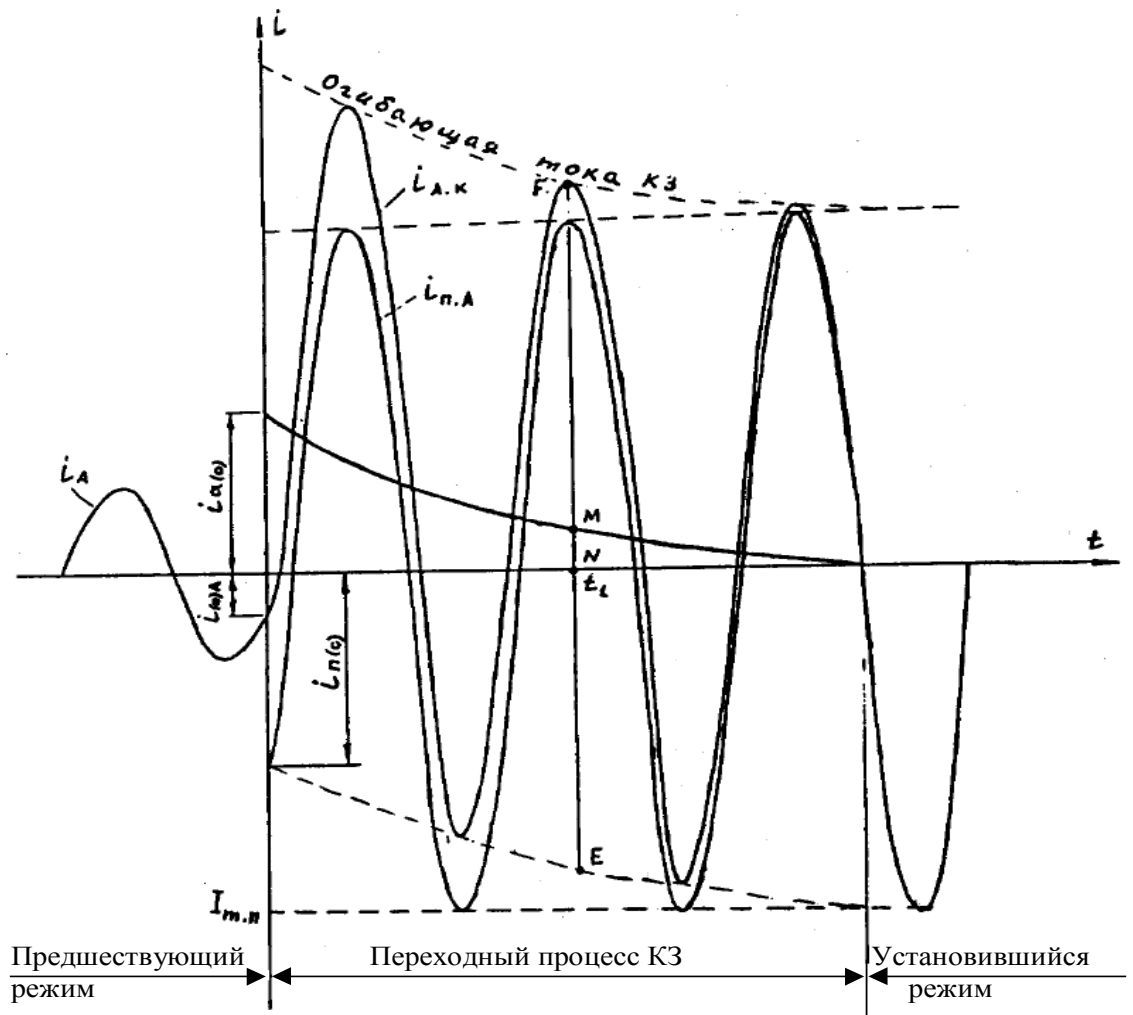


Рис. 3.4. Кривые изменения токов в фазе А при трехфазном коротком замыкании

$$\frac{\partial i_{\kappa}}{\partial t} = \omega \cos(\omega t + \alpha - \varphi_{\kappa}) + \frac{1}{T_{a.\kappa}} \sin(\alpha - \varphi_{\kappa}) e^{-\frac{t}{T_{a.\kappa}}} = 0;$$

$$\frac{\partial i_{\kappa}}{\partial \alpha} = \cos(\omega t + \alpha - \varphi_{\kappa}) - \cos(\alpha - \varphi_{\kappa}) e^{-\frac{t}{T_{a.\kappa}}} = 0;$$

$$\omega + \frac{1}{T_{a.\kappa}} \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_{\kappa}) = 0;$$

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_{\kappa}) = -\omega T_{a.\kappa};$$

$$T_{a.\kappa} = \frac{X_{\kappa}}{\omega R_{\kappa}};$$

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_{\kappa}) = -\frac{X_{\kappa}}{R_{\kappa}}.$$

Но выражение $\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_{\kappa})$ может быть равно отношению x_{κ}/R_{κ} только при $\alpha = 0$. Следовательно, мгновенное значение полного тока КЗ может достигать максимума при условии, что цепь до КЗ разомкнута, т.е. $I_m = 0$, а напряжение на за-

жимах источника питания в момент возникновения КЗ проходит через нуль ($\alpha = 0$).

Для высоковольтных цепей индуктивное сопротивление x_k преобладает над активным R_k , т.е. $\varphi_k \approx 90^\circ$. Поэтому условие возникновения наибольшего значения апериодической составляющей тока КЗ и условие, при котором достигает максимума мгновенное значение полного тока КЗ очень близки друг к другу. Таким образом, в практических расчетах максимальное мгновенное значение полного тока КЗ, которое называют ударным током i_y , обычно находят при наибольшем значении апериодической составляющей $i_{a(0)} = I_{m.п.}$. Этот случай рассматривается как *расчетный* и используется для проверки выбранных коммутационных аппаратов по токам КЗ. Таким образом, i_y достигает максимума при следующих параметрах:

$$\alpha = 0; \varphi_k \approx 90^\circ; I_m = 0.$$

Это говорит о том, что КЗ происходит на каком-то очень коротком ответвлении без нагрузки. В этом случае сопротивлением этого ответвления можно пренебречь.

На рис. 3.5 приведена *расчетная схема* замещения, а рис. 3.6 осциллограмма тока КЗ для этого расчетного случая.

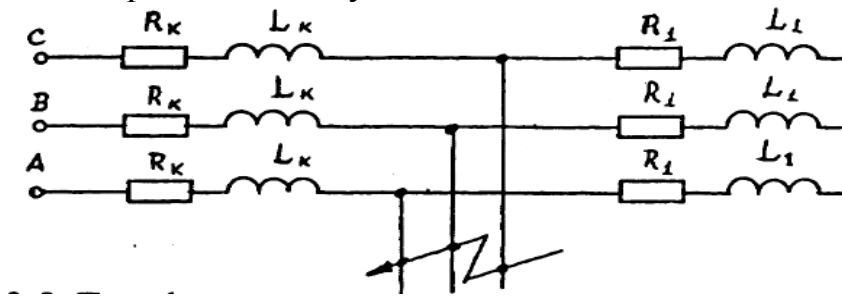


Рис. 3.5. Трехфазная схема замещения для расчетного случая тока КЗ

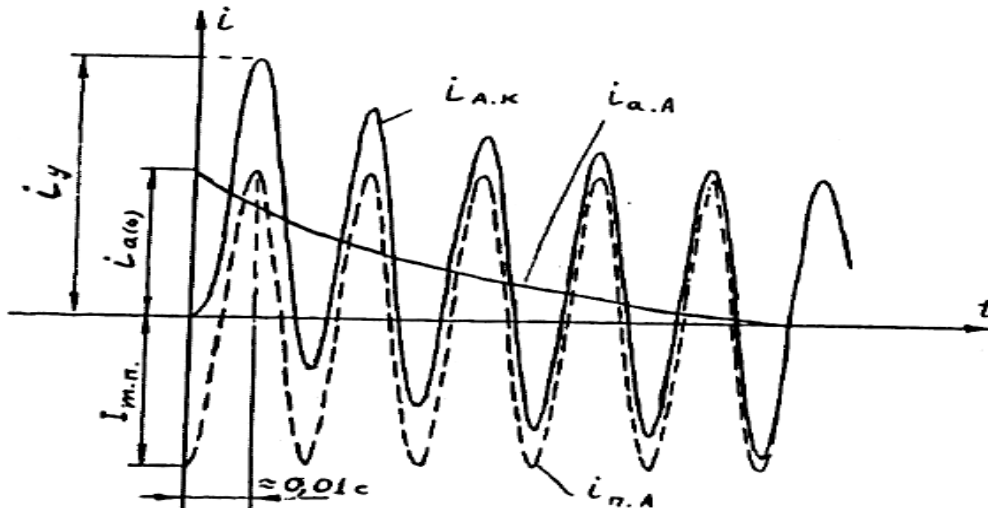


Рис. 3.6. Осциллограмма тока КЗ в фазе А при наибольшем начальном значении апериодической составляющей $i_{a(0)}$

В фазах В и С токи будут симметричные и иметь равные начальные значения $i_{a(0)}$. Ударный ток i_y в фазе А наступает примерно через 0,01с при частоте питающей сети $f = 50$ Гц.

Таким образом, выражение для ударного тока КЗ можно записать в следующем виде:

$$i_y \approx I_{m.п} + I_{m.п} e^{-\frac{0,01}{T_{a.к}}} = k_y I_{m.п}, \quad (3.11)$$

где k_y - ударный коэффициент, равный

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a.б}}}. \quad (3.12)$$

Ударный коэффициент показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической составляющей тока КЗ и характеризует удаленность точки КЗ от источника питания. Ударный коэффициент изменяется в пределах:

$$1 < k_y < 2,$$

что соответствует предельным значениям $T_{a.к}$, т.е. $T_{a.к} = 0$ (при $L_K = 0$) и $T_{a.к} = \infty$ (при $R_K = 0$). Чем ближе точка КЗ будет находиться к источнику питания, тем выше ударный коэффициент. Если величина k_y близка к двум, то это говорит, что точка КЗ находится очень близко к зажимам источника питания.

Естественно, чем меньше $T_{a.к}$, тем быстрее затухает апериодическая составляющая и тем соответственно меньше k_y . В сетях высокого напряжения апериодическая составляющая практически исчезает через 0,1...0,3 с, а в сетях низкого напряжения она практически незаметна.

Ввиду того, что апериодические составляющие тока КЗ в фазах различные, то называть трехфазное КЗ симметричным, строго говоря, нельзя. Утверждение, что трехфазное КЗ симметричное, справедливо лишь для периодических составляющих тока короткого замыкания.

4. НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КЗ

Магнитосвязанные обмотки синхронных машин в отличие от обмотки трансформатора подвижны друг относительно друга. Это говорит о том, что взаимоиндукция между обмотками будет изменяться. Установить строгую закономерность этого изменения весьма сложно [2].

Любой электромагнитный переходный процесс электрической машины сопровождается в той или иной степени качанием роторов, т.е. электромеханическим процессом.

На характер протекания переходного процесса машины существенное влияние оказывает, установленный на синхронном генераторе, автоматический регулятор напряжения.

Из сказанного следует, что даже при ненасыщенной магнитной системе электрической машины точный анализ переходного процесса трехфазного КЗ является весьма сложной задачей. Поэтому при практических расчетах, как правило, рассматривают параметры переходного процесса для какого либо момента времени.

Применяемые в настоящее время методики расчета электромагнитных переходных процессов используют схемы замещения, в которых электрические машины характеризуются сверхпереходными, переходными или синхронными параметрами.

В начальный момент КЗ ($t=0$) синхронная машина характеризуется (при наличии демпферных обмоток на роторе) сверхпереходными ЭДС и индуктивностью, а при отсутствии демпферных обмоток - переходными.

Практически на всех синхронных машинах имеются демпферные обмотки, поэтому исследуем сверхпереходные параметры синхронной машины и установим их физическую сущность.

4.1. Сверхпереходные ЭДС и индуктивности синхронной машины

При внезапном изменении режима (для момента $t = 0$) воспользуемся тем, что результирующее потокосцепление ротора и его угловая скорость вращения остаются неизменными:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{f(0)} &= \Psi_{f0}, \\ \omega_{(0)} &= \omega_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Иными словами, в момент времени $t = 0$ синхронную машину можно рассматривать как трансформатор.

Продолжая, обратимся вновь к системе относительных единиц и вспомним, что все величины ротора приведены к напряжению статора и выражены в относительных единицах.

В системе относительных единиц за единицу измерения угловых скоростей принимают синхронную угловую скорость $\omega_c = \omega_6$. Тогда:

— индуктивное сопротивление равно индуктивности:

$$X_{*(6)} = \omega_{c*(6)} \cdot L_{*(6)} = L_{*(6)}; \quad (4.2)$$

— потокосцепление ψ равно:

$$\Psi_{*(6)} = I_{*(6)} \cdot L_{*(6)} = I_{*(6)} \cdot X_{*(6)}; \quad (4.3)$$

— ЭДС в обмотках равна:

$$E_{*(6)} = \omega_{c*(6)} \cdot \Psi_{*(6)} = \Psi_{*(6)} = I_{*(6)} \cdot X_{*(6)}. \quad (4.4)$$

Эта возможность замены одних относительных величин на численно равные другие является одним из существенных преимуществ системы относительных единиц.

Все дальнейшие рассуждения будем вести из условия, что ротор синхронных машин симметричен, т.е. $x_d \approx x_q$.

На роторе кроме обмотки возбуждения имеется демпферная. При этом примем, что обмотки статора и обе обмотки ротора в продольной оси d-d связаны между собой общим потоком взаимоиндукции $\dot{\Phi}_{ad}$, который определяет реактивность продольной реакции x_{ad} .

В такой машине внезапное приращение потока $\Delta\dot{\Phi}_{ad(0)}$ вызовет ответную реакцию в обмотках ротора, которая образуется из приращений магнитного потока обмотки возбуждения $\Delta\dot{\Phi}_{f(0)}$ и потока продольной демпферной обмотки $\Delta\dot{\Phi}_{ld(0)}$. Баланс результирующих потокосцеплений должен остаться неизменным, т.е. должны быть соблюдены следующие равенства:

— для обмотки возбуждения:

$$\Delta\dot{I}_{f(0)}(x_{\sigma f} + x_{ad}) + \Delta\dot{I}_{fd(0)}x_{ad} + \Delta\dot{I}_{d(0)}x_{ad} = 0, \quad (4.5)$$

— для продольной демпферной обмотки:

$$\Delta\dot{I}_{ld(0)} \cdot (x_{\sigma ld} + x_{ad}) + \Delta\dot{I}_{f(0)}x_{ad} + \Delta\dot{I}_{d(0)}x_{ad} = 0, \quad (4.6)$$

где $\Delta\dot{I}_{ld(0)}$, $x_{\sigma ld}$ - начальный ток, наведенный в продольной демпферной обмотке, и ее реактивность рассеяния;

$\Delta\dot{I}_{f(0)}$, $\Delta\dot{I}_{d(0)}$ - приращение токов в обмотках возбуждения и статорной соответственно в начальный момент времени.

Приравняв левые части выражений (4.5) и (4.6), получим простую связь между наведенными токами $\Delta\dot{I}_{f(0)}$, $\Delta\dot{I}_{ld(0)}$:

$$\Delta\dot{I}_{f(0)} \cdot x_{\sigma f} = \Delta\dot{I}_{ld(0)}x_{\sigma ld}. \quad (4.7)$$

Из (4.7) следует, что чем меньше рассеяние обмотки, тем больше наведенный в ней ток и тем соответственно больше ее участие в создании ответной реакции ротора.

Эти выражения записаны из условия, что обмотка статора и обе обмотки в продольной оси ротора связаны между собой общим потоком взаимоиндукции, которая определяется реактивностью x_{ad} . Магнитные потоки явнополюсной машины с демпферными обмотками приведены на рис. 4.1.

Выделим из потока Φ_{ad} ту его часть $\Phi_{\sigma ad}$, которая замыкается с частичным вытеснением наведенным током в цепях ротора по путям рассеяния обмотки возбуждения и демпферной обмотки или, иными словами, потокосцепление $\psi_{\sigma ad}$.

$$\psi_{\sigma ad} = I_d \cdot \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma ld}}}, \quad (4.8)$$

где I_d - ток в статорной цепи по продольной оси.

Три магнитосвязанные обмотки в продольной оси машины могут быть представлены эквивалентной схемой замещения (рис. 4.2) как для трехобмоточного трансформатора.

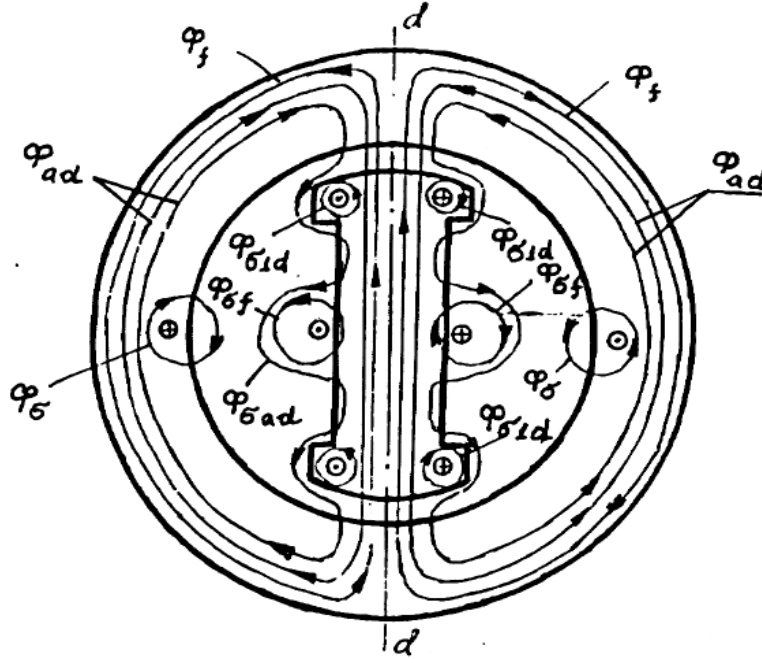


Рис. 4.1. Магнитные потоки явнополусной синхронной машины с демпферной обмоткой в начальный момент возникновения КЗ:

Φ_f - магнитный поток обмотки возбуждения; Φ_{ad} - магнитный поток реакции статорной обмотки по продольной оси, $\Phi_{\sigma f}$ - магнитный поток рассеяния обмотки возбуждения, $\Phi_{\sigma ld}$ - магнитный поток рассеяния демпферной обмотки

Суммируем $\psi_{\sigma ad}$ с потокоцеплением от магнитного потока Φ_{σ} , получим:

$$\psi_{\sigma ad} + \psi_{\sigma} = I_d \cdot \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma ld}}} + I_d \cdot X_{\sigma} = I_d \cdot X_d'', \quad (4.9)$$

$$\text{где } X_d'' = X_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma ld}}}. \quad (4.10)$$

Потокоцепление ψ_d'' численно равно соответствующей ЭДС E_d'' (в системе относительных единиц, приведенных к напряжению статорной обмотки). Эту ЭДС называют сверхпереходной. Она остается постоянной при внезапном изменении режима и позволяет связать предшествующий режим машины с новым. В этом заключается ее особая практическая ценность.

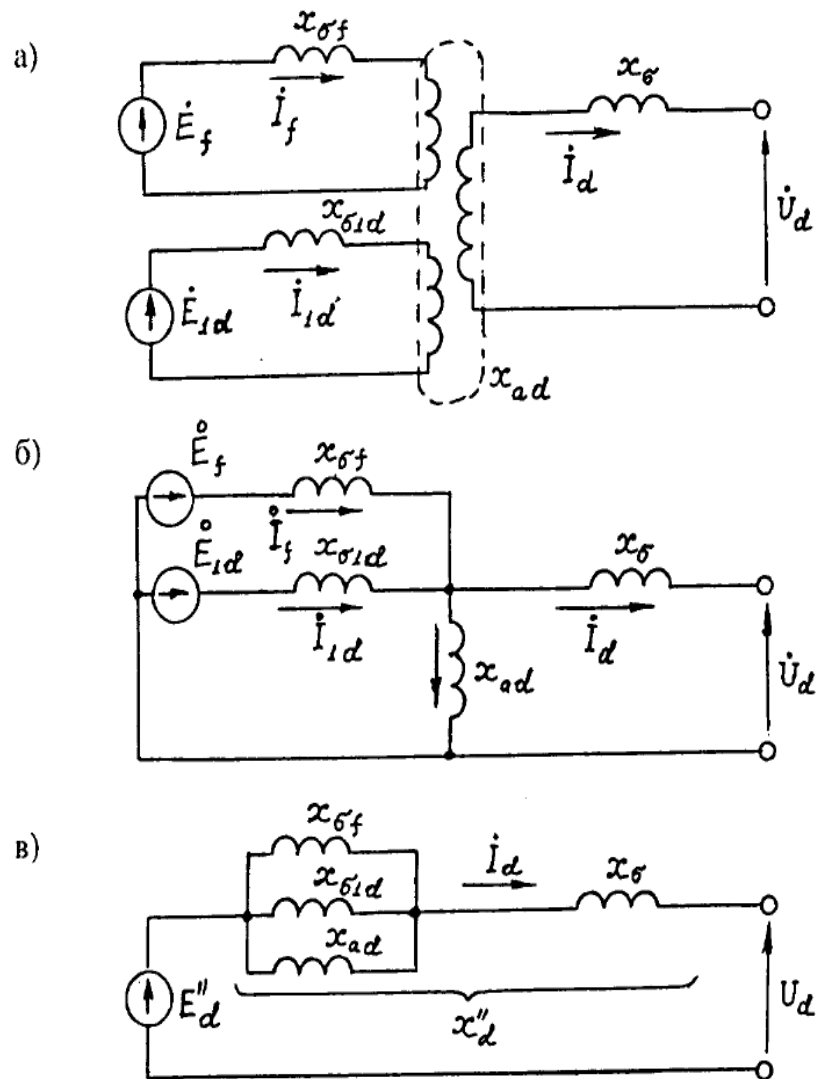


Рис. 4.2. Схема замещения синхронной машины для начального момента времени

Сверхпереходную ЭДС измерить нельзя и поэтому ее иногда называют расчетной или условной ЭДС.

Таким образом, в начальный момент внезапного нарушения режима машину с демпферными обмотками характеризуют сверхпереходным индуктивным сопротивлением x''_d и ЭДС E''_d . Параметр x''_d приводится в паспортных данных машины.

Сверхпереходная ЭДС находится из следующего очевидного равенства:

$$\dot{E}_{d(0)}'' = E_{d.0}'' = \dot{U}_{d(0)} + j\dot{I}_{d(0)} \cdot x''_d, \quad (4.11)$$

где $U_{d.0}$, $I_{d.0}$ - составляющие напряжения и тока предшествующего режима машины.

Формулу (4.11) можно вывести через потокосцепление статора.

Поток ($\Phi_{ad} - \Phi_{\sigma ad}$) совместно с потоком Φ_f (см. рис. 4.1) образуют потокосцепление статора:

$$\Psi_d'' = \Psi_f - (\Psi_{ad} - \Psi_{\sigma ad}) = E_d - \left(I_d \cdot x_{ad} - I_d \cdot \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_{\sigma ld}}} \right) = \quad (4.12)$$

$$= U_d + I_d \cdot x_d'' = E_d''.$$

Выражение (4.12) показывает, что сверхпереходная ЭДС меньше, чем синхронная E_d . Необходимо отметить, что приставка "сверх" в термине "сверхпереходные" подчеркивает, что в обмотке возбуждения и демпферной обмотке протекают наведенные токи, вызванные, в соответствии с законом Ленца, приращением магнитного потока статорной обмотки $\Delta\Phi_{ad(0)}$.

По истечении некоторого времени после начального момента возникновения КЗ, наведенный ток в демпферной обмотке затухнет до 0 и тогда машина будет характеризоваться так называемой переходной ЭДС E_d' и переходным со-

противлением $x_d' = x_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}}}.$

Переходные ЭДС и индуктивное сопротивление учитываются при расчетах электромеханических переходных процессов, а сверхпереходные - при расчете токов КЗ: периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени $I_{n(0)}$ и для любого момента времени (метод типовых кривых), мгновенного и действующего ударного значения тока КЗ i_y и I_y соответственно.

Согласно схеме замещения (рис. 4.2) можно показать:

$$x_d'' < x_d' < x_d,$$

что подтверждается при рассмотрении физических процессов.

В стационарном (установившемся) режиме, создаваемый ток статора магнитный поток частично замыкается по путям рассеяния статорной обмотки (Φ_{σ}), а основная его часть, пройдя воздушный зазор, свободно замыкается через полюсы и массив ротора (Φ_{ad}). Поскольку сопротивление для магнитного потока в данном случае мало, его индуктивность получается большой, а значит и большим индуктивное сопротивление x_d , которым характеризуется машина в установившемся режиме.

При внезапном изменении (например, увеличении) магнитного потока статора в обмотке возбуждения и демпферной обмотке наводятся токи, которые создают магнитные потоки, направленные навстречу потоку статорной обмотки, т.е. последний встречает наибольшее сопротивление и индуктивность резко уменьшается, а значит и $x_d'' \ll x_d$.

В этом случае часть магнитного потока статора интенсивно вытесняется из массива ротора на пути рассеяния ($\Phi_{\sigma ad}$).

Свободные токи в демпферной обмотке, направленные навстречу току статора, со временем затухают и индуктивность увеличивается, т.е. $x_d' > x_d''$. Как только затухнут свободные токи в обмотке возбуждения, наступит установившийся режим.

4.2. Параметры двигателей и обобщенной нагрузки в начальный момент времени

Изложенное выше в равной мере относится как к синхронным генераторам, так и к синхронным двигателям и компенсаторам. Различие в их поведении в начальный момент переходного процесса определяется в основном величинами их сверхпереходных ЭДС. У перевозбужденного синхронного двигателя или компенсатора сверхпереходная ЭДС выше подведенного напряжения. Поэтому при любом резком снижении напряжения посылаемый двигателем реактивный ток во всех случаях возрастает.

Если же синхронный двигатель работает с недовозбуждением, то сверхпереходная ЭДС такого двигателя ниже подведенного напряжения. В этом случае возможно два режима:

- 1) потребление тока от сети двигателем;
- 2) генерирование реактивного тока.

Режим, в котором будет работать синхронный двигатель (компенсатор), зависит от степени снижения подведенного напряжения U_{01} к двигателю:

- первый режим - $E'' < U_0$;
- второй режим - $E'' > U_0$.

Если же $E'' = U_0$, то тока в начальный момент переходного процесса протекать не будет.

В расчетах токов КЗ принято, что синхронные двигатели работают с перевозбуждением, а его сверхпереходное сопротивление равно $x_{*(H)}'' \approx 0,2$ о.е.

Рассмотрим теперь параметры асинхронного двигателя, которыми он характеризуется в начальный момент времени. Основную часть (60-70%) промышленной нагрузки составляют асинхронные двигатели. В нормальном режиме они работают с малым скольжением (2-5%). Российский профессор Н.Н. Щедрин доказал, что практически можно пренебречь таким малым скольжением и асинхронный двигатель в начальный момент переходного процесса рассматривать как недовозбужденный синхронный двигатель. Большая часть асинхронных двигателей, находящихся в эксплуатации, имеют на роторе двойную короткозамкнутую обмотку, т.е. два замкнутых контура. Благодаря этому и полной симметрии ротора для асинхронного двигателя можно установить сверхпереходные параметры и не раскладывать их по продольной и поперечной осям. Сверхпереходная реактивность двигателя может быть получена из его схемы замещения, которая аналогична схеме рис. 4.2, в. Из такой схемы замещения следует, что

сверхпереходная реактивность асинхронного двигателя x'' представляет собой реактивность короткого замыкания, т.е. когда ротор заторможен ($S=100\%$). Относительную величину этой реактивности $x''_{*(H)}$ можно определять по следующей формуле:

$$x''_{*(H)} = \frac{1}{k_i} \approx 0,2 \text{ о.е.}, \quad (4.13)$$

где k_i - номинальная кратность пускового тока, равная:

$$\frac{I_{H.\text{пуск}}}{I_H}.$$

Начальное значение сверхпереходной ЭДС E'' двигателя определяется из его предшествующего режима согласно векторной диаграмме, приведенной на рис. 4.3.

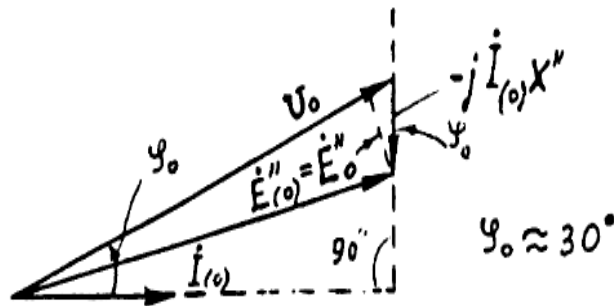


Рис. 4.3. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

$$E''_{(0)} = E''_0 = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 - I_0 x'')^2}. \quad (4.14)$$

Формулу (4.14) при практических расчетах можно еще упростить, принимая E''_0 равной проекции вектора этой ЭДС на вектор \dot{U}_0 :

$$E''_0 \approx U_0 - I_0 x'' \sin \varphi_0, \quad (4.15)$$

где U_0 , I_0 , φ_0 - предшествующие напряжение, ток и угол сдвига между их векторами.

В случае, если двигатель работает при номинальной нагрузке, то сверхпереходная ЭДС, приведенная к номинальному напряжению, выраженная в относительных единицах:

— для синхронного двигателя и генератора:

$$E''_{0*(H)} \approx \frac{U_H}{U_H} + \frac{I_H}{I_H} \frac{x''}{x_H} \sin \varphi_H = 1 + x''_{*(H)} \sin \varphi_H = 1,1, \text{ о.е.} \quad (4.16)$$

— для асинхронного двигателя:

$$E''_{0*(H)} \approx 1 - x''_{*(H)} \sin \varphi_H = 0,9, \text{ о.е.} \quad (4.17)$$

На рис. 4.4 показана осциллограмма тока асинхронного двигателя при внезапном КЗ на его выводах.

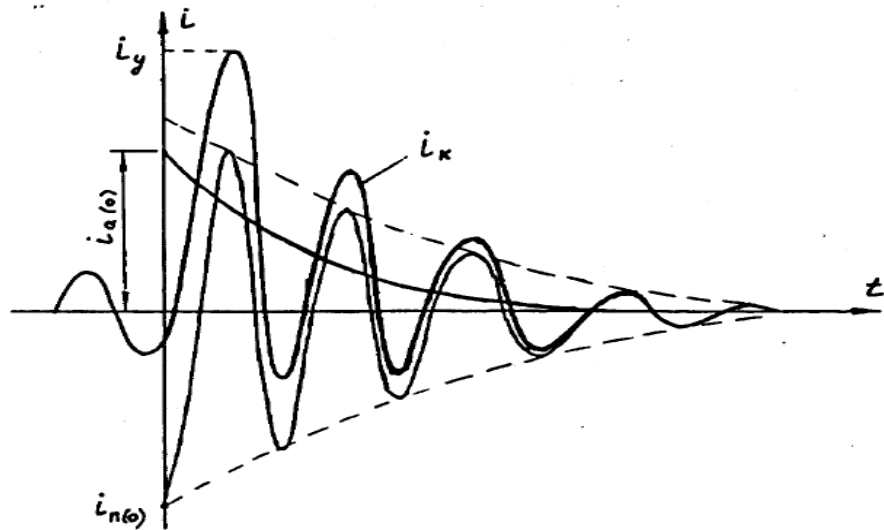


Рис. 4.4. Кривая изменения тока асинхронного двигателя при внезапном КЗ на его выводах

Осциллограмма тока для синхронного двигателя имеет аналогичный характер, но с более длительной генерацией, чем от асинхронного двигателя.

В практических расчетах начального момента переходного процесса учитывают отдельно только крупные двигатели электрически непосредственно связанные с точкой КЗ (двигатели более 100 кВт) [1].

Все остальные двигатели вместе с другими токоприемниками учитываются только в виде обобщенной нагрузки, характеризуя ее средними параметрами, полученными для типового состава потребителей промышленного района и типовой схемы питающей его сети.

Установлено, что в начальный момент переходного процесса обобщенную нагрузку можно приближенно характеризовать следующими величинами: $x_{*(H)}'' = 0,35$ о.е.; $E_{*(H)}'' = 0,85$ о.е. Эти параметры выражены в относительных единицах при полной рабочей мощности нагрузки (МВ·А) и среднем номинальном напряжении той ступени, где она присоединена.

4.3. Практические рекомендации при расчете начальной периодической составляющей тока КЗ и ударного тока

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ $I_{п.(0)}$ часто еще называют сверхпереходным током I'' .

После того как мы установили параметры, которыми характеризуются все элементы электрической системы в момент внезапного нарушения режима ($t=0$), вычисление начальной периодической составляющей тока КЗ принципиальных трудностей не вызывает.

Допущение симметричности роторов синхронных машин $x''_d = x''_q$ исключает необходимость разложения отдельных величин по продольной и поперечной осям; при этом сверхпереходная ЭДС определяется по (4.16 и 4.17). Такое допущение при определении токов в цепи статора дает погрешность в расчетах +5 % [2].

Таким образом, для расчета $I_{п.(0)}$ - это действующее значение периодической составляющей при наибольшей величине тока КЗ, при трехфазном КЗ необходимо составить схему замещения, введя в нее все источники электрической энергии своими сверхпереходными параметрами (генераторы, синхронные компенсаторы, крупные синхронные и асинхронные двигатели, обобщенную нагрузку). При отсутствии необходимых данных и во всех приближенных расчетах можно принимать среднее значение x'' и E''_0 , приведенные в табл. 2.1[4].

$$I_{п.(0)} = I'' = \frac{E''_{\Sigma}}{x_{\Sigma}}, \quad (4.18)$$

где E''_{Σ} - результирующая (эквивалентная) сверхпереходная ЭДС схемы замещения, свернутой вокруг точки КЗ;

x_{Σ} - результирующее сопротивление схемы замещения.

При определении мгновенного ударного тока КЗ обычно учитывают затухание лишь апериодической составляющей тока, считая, что амплитуда периодической составляющей за 0,01 с практически сохраняет свою начальную величину $I_{м.п.}$. При этом ударный ток для наиболее тяжелых условий определяется как:

$$i_y = k_y \sqrt{2} \cdot I_{п.(0)},$$

где ударный коэффициент учитывает апериодическую составляющую тока КЗ.

Ударный коэффициент (см. гл. 3) зависит от электромагнитной постоянной времени $T_{а.к}$ или от отношения x_{Σ}/R_{Σ} . Эта зависимость представлена на рис. 4.5.

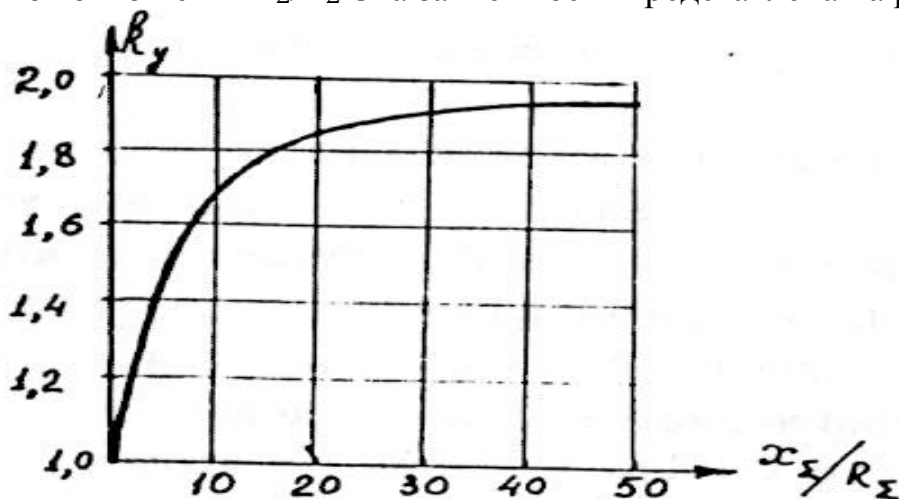


Рис. 4.5. Зависимость ударного коэффициента от постоянной времени $T_{а.к}$ (или отношения x_{Σ}/R_{Σ})

От достоверности определения величины ударного коэффициента в значительной степени зависит правильность выбора токоведущих шин, изоляторов,

выключателей. Практический расчет ударных коэффициентов в сложных схемах замещения приведен в разделе 4.3.1.

При КЗ вблизи крупных генераторов ударный коэффициент близок к 2, по мере удаленности КЗ величина его падает, причем тем интенсивнее, чем больше протяженность воздушных и кабельных линий.

При учете асинхронных двигателей в качестве дополнительных источников питания необходимо иметь ввиду, что затухание периодической и апериодической составляющих токов КЗ от них происходит примерно с одинаковыми постоянными времени (см. рис. 4.4). Проведенные испытания позволили выделить примерный диапазон величины ударного коэффициента 1,6...1.8 [2]. Для мелких двигателей и обобщенной нагрузки можно принимать $k_y \approx 1$.

У синхронных двигателей величина ударного коэффициента примерно та же, что и у синхронных генераторов одинаковой мощности.

Таким образом, при отдельном учете асинхронных и синхронных двигателей ударный ток (мгновенное значение) в месте КЗ составляет:

$$i_y = k_y \sqrt{2} I_{п.(0)} + k_{y.ад} \sqrt{2} I_{п.(0).ад} + k_{y.сд} \sqrt{2} I_{п.(0).сд}, \quad (4.19)$$

где $I_{п.(0)}$ - периодические составляющие тока КЗ в начальный момент времени от всех источников (кроме тех, которые непосредственно электрически не связаны с точкой КЗ); от асинхронного и синхронного двигателей, электрически непосредственно связанных с точкой КЗ, соответственно.

Из формулы (4.19) видно, что для определения i_y необходимо определить величины ударных коэффициентов, а для этого надо рассчитать эквивалентную электромагнитную постоянную времени.

4.3.1. Определение эквивалентной электромагнитной постоянной времени цепи короткого замыкания

Для цепи короткого замыкания, состоящей из последовательно соединенных элементов, определение электромагнитной постоянной времени производится по формуле (3.3), где под x_1 и R_1 следует понимать соответственно суммарные индуктивные и активные сопротивления цепи короткого замыкания.

При сложной схеме (разветвленная, кольцевые связи), определение апериодической составляющей тока является сложной задачей.

Свободный ток в какой-то момент времени t в этом случае находится из равенства

$$I_{a.t} = I_{a.1} e^{p_1 t} + I_{a.2} e^{p_2 t} + I_{a.3} e^{p_3 t} + \dots + I_{a.n} e^{p_n t}, \quad (4.20)$$

где $I_{a.1}, I_{a.2}, \dots, I_{a.n}$ - начальные значения частных свободных токов (для отдельных ветвей схемы);

p_1, p_2, p_n - корни характеристического уравнения.

При отсутствии емкостей в схеме все корни характеристического уравнения являются вещественными отрицательными величинами:

$$p_1 = -\frac{1}{T_{a.k.1}}; \quad p_2 = -\frac{1}{T_{a.k.2}}; \dots; \quad p_n = -\frac{1}{T_{a.k.n}},$$

где $T_{a.k.1}, T_{a.k.2}, \dots, T_{a.k.n}$ - электромагнитные постоянные времени частных свободных токов.

Начальные значения частных свободных токов и их электромагнитные постоянные зависят от параметров всех элементов схемы замещения. Расчет даже не очень сложной схемы требует значительного объема вычислительной работы. Чем больше параллельных ветвей с активно - индуктивными сопротивлениями, тем выше порядок степени характеристического уравнения. Поэтому в практических расчетах принимают следующее приближенное выражение:

$$I_{a.t} \approx I_{a(0)} e^{-\frac{t}{T_{a.k.э}}}, \quad (4.21)$$

где $I_{a(0)}$ - начальное значение апериодической составляющей тока;

$T_{a.k.э}$ - эквивалентная электромагнитная постоянная времени цепи короткого замыкания, которая определяется по формуле:

$$T_{a.k.э} = \frac{x_{\Sigma}}{\omega \cdot R_{\Sigma}}, \quad (4.22)$$

где x_{Σ} - суммарное индуктивное сопротивление схемы замещения, найденное при отсутствии всех активных сопротивлений ($R = 0$);

R_{Σ} - суммарное активное сопротивление схемы замещения, найденное при отсутствии всех индуктивных сопротивлений ($x = 0$).

Величина $I_{a(0)}$ определяется по начальным условиям для ветви с коротким замыканием для этого:

1) рассчитывается начальное значение периодической составляющей тока КЗ;

2) определяется начальное значение $I_{a(0)}$, зная, что ток предшествующего режима (величина его известна) равен сумме периодической и апериодической составляющих тока.

В случае отсутствия тока предшествующего режима $I_{a(0)} = I_{m.n}$.

Таким образом, при использовании формулы (3.11) для сложной схемы замещения вместо $T_{a.k}$ необходимо подставить $T_{a.k.э}$, которая определяется в следующей последовательности:

1) составляется схема замещения при чисто индуктивных сопротивлениях отдельных элементов;

2) схема замещения сворачивается до простейшей с расчетом x_{Σ} ;

3) повторяются п.п.1,2 при условии, что сопротивления всех элементов чисто активные. При этом активные сопротивления отдельных элементов схемы можно ориентировочно вычислить, используя данные табл. 4.1 [2], либо табл. 2.41, 2.44 [3].

Значения x/R для элементов электрической системы

№ п/п	Наименование элемента	Отношение x/R
1	Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	15...85
2	То же, мощностью 100...500 МВт	100...140
3	Гидрогенераторы с демпферными обмотками	40...60
4	То же, без демпферных обмоток	60...90
5	Трансформаторы мощностью 5...30 МВА	7...17
6	То же, мощностью 60...500 МВА	20...50
7	Реакторы 6...10 кВ до 1000 А	15...70
8	То же, 1500 А и выше	40...80
9	Воздушные линии	2...8
10	Трехжильные кабели 6...10 кВ с медными и алюминиевыми жилами сечением $(3 \times 95) \dots (3 \times 185)$	0,2...0,8
11	Обобщенная нагрузка	2,5

Эквивалентную электромагнитную постоянную можно принимать в зависимости от места возникновения КЗ согласно табл. 3.8 [5].

5. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ПРОСТЕЙШЕЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ, ПИТАЕМОЙ ОТ ГЕНЕРАТОРА ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

Под генератором ограниченной мощности будем понимать такой источник, когда при коротком замыкании во внешней цепи напряжение на его зажимах и частота изменяются.

В главе 3 был рассмотрен вопрос о переходном процессе в простейшей цепи, питаемой от источника неограниченной мощности. Сравним кривые изменения токов в фазах, которые получатся при КЗ в цепи, подключенной к источнику ограниченной мощности с кривой, приведенной на рис. 3.6. При этом рассмотрим два случая:

- 1) переходный процесс при КЗ в цепи, питаемой от генератора без АРВ;
- 2) то же, но на генераторе установлен АРВ.

В обоих случаях будем считать, что КЗ произошло за сопротивлением цепи короткого замыкания Z_k , равному сверхпереходному сопротивлению генератора x_d'' . На генераторе имеются демпферные обмотки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. РД 153-34.0 – 20.527 – 98. Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования/ под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002 – 152 с
2. Расчёт коротких замыканий и выбор электрооборудования: учеб. пособие для студ. высш. заведений/Н.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.А. Старшинов и др. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 416 с
3. Переходные процессы в электроэнергетических системах: метод. указания по лабор. работам №2 – 3/соб. : А.Э. Бобров, А.М. Дяков, В. Б. Зорин, Л.И. Пилюшенко. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. -36 с