

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Электрические станции»

В. А. Булат
А. Г. Губанович
С. М. Силюк

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Пособие для студентов специальностей
1-43 01 01 «Электрические станции»,
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
и 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск
БНТУ
2020

УДК 621.311 (075.8)

ББК 31.27я78

Б90

Р е ц е н з е н т ы:

зав. кафедрой «Электроснабжение» Белорусского государственного
аграрного технического университета, канд. техн. наук,

доцент *В. М. Збродыга*;

канд. техн. наук, ведущий инженер

ОАО «Белэлектромонтажналадка» *М. С. Ломан*

Булат, В. А.

Б90 Электромагнитные переходные процессы : пособие для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» и 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика» / В. А. Булат, А. Г. Губанович, С. М. Силюк. – Минск : БНТУ, 2020. – 214 с.

ISBN 978-985-550-958-6.

В пособии рассматриваются электромагнитные переходные процессы в электроэнергетической системе. Излагаются физические явления, обусловленные переходными процессами, методы их анализа и расчета.

Пособие подготовлено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по электроэнергетическим специальностям. Может быть также использовано магистрантами, аспирантами, слушателями центров подготовки и повышения квалификации инженеров-энергетиков, инженерно-техническими работниками, занятыми проектированием и эксплуатацией электроэнергетических систем.

УДК 621.311 (075.8)

ББК 31.27я78

ISBN 978-985-550-958-6

© Булат В. А., Губанович А. Г.,
Силюк С. М., 2020

© Белорусский национальный
технический университет, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1. Общие сведения об электромагнитных переходных процессах.....	10
1.1. Основные понятия и определения.....	10
1.2. Причины возникновения переходных процессов и их последствия.....	14
1.3. Назначение расчетов и требования к ним.....	16
2. Общие указания к выполнению расчетов.....	17
2.1. Основные допущения.....	17
2.2. Система относительных единиц.....	18
2.3. Составление схемы замещения.....	21
2.4. Методы преобразования схем замещения.....	31
3. Установившийся режим трехфазного короткого замыкания.....	41
3.1. Основные характеристики синхронной машины в установившемся режиме трехфазного короткого замыкания.....	42
3.2. Аналитический расчет установившегося режима короткого замыкания.....	46
3.3. Расчет установившегося режима трехфазного короткого замыкания в сложных схемах.....	53
3.4. Влияние и учет нагрузки в установившемся режиме короткого замыкания.....	56
3.5. Определение остаточного напряжения в установившемся режиме короткого замыкания.....	59
3.6. Внезапное трехфазное короткое замыкание в простейшей электрической цепи.....	60
3.7. Ударный ток короткого замыкания.....	67
3.8. Действующее значение тока короткого замыкания и его составляющих.....	68

3.9. Внезапное трехфазное короткое замыкание в цепи с трансформаторами (неподвижная магнитосвязанная цепь).....	70
3.10. Переходный процесс при включении трансформатора на холостой ход.....	72
4. Переходный процесс при внезапном коротком замыкании в подвижных магнитосвязанных цепях	77
4.1. ЭДС и сопротивление синхронной машины в начальный момент переходного процесса.....	77
4.2. Параметры синхронной машины.....	85
4.2.1. ЭДС синхронной машины	85
4.2.2. Индуктивности (сопротивления) синхронной машины.....	86
4.3. Составляющие тока короткого замыкания синхронной машины без успокоительных обмоток	87
4.4. Составляющие тока короткого замыкания синхронной машины с успокоительными обмотками.....	92
5. Влияние и учет нагрузки в начальный момент короткого замыкания.....	97
6. Учет системы бесконечной мощности при расчете переходных процессов	102
7. Практические методы расчета переходных процессов.....	105
7.1. Метод расчетных кривых	105
7.2. Порядок расчета переходных процессов по расчетным кривым.....	107
7.2.1. Расчет по общему затуханию.....	107
7.2.2. Расчет с учетом индивидуальных коэффициентов затухания.....	110
7.3. Расчет токов короткого замыкания по методу типовых кривых	114
8. Расчет переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях	120
8.1. Особенности несимметричных коротких замыканий ...	122

8.2. Появление высших гармоник при несимметричных коротких замыканиях	124
8.3. Сопротивления элементов для токов различных последовательностей	126
8.3.1. Прямая последовательность	126
8.3.2. Обратная последовательность	127
8.3.3. Нулевая последовательность	128
8.4. Составление схем замещения для токов различных последовательностей	145
8.4.1. Схема замещения прямой последовательности	145
8.4.2. Схема замещения обратной последовательности	145
8.4.3. Схема замещения нулевой последовательности	146
9. Однократная поперечная несимметрия. токи и напряжения при различных видах несимметричных коротких замыканий	151
9.1. Двухфазное короткое замыкание	151
9.2. Однофазное короткое замыкание	155
9.3. Двухфазное короткое замыкание на землю	159
10. Соотношения между токами трехфазного короткого замыкания и токами несимметричных коротких замыканий	165
11. Учет переходных сопротивлений в месте повреждения при несимметричных коротких замыканиях	167
11.1. Двухфазное короткое замыкание	167
11.2. Однофазное короткое замыкание	168
11.3. Двухфазное короткое замыкание на землю	170
12. Правило эквивалентности прямой последовательности (правило щедрина) и его применение в расчетах	171
13. Аналитический расчет несимметричных коротких замыканий	174

14. Расчет несимметричных коротких замыканий по расчетным кривым	175
15. РАСпределение и трансформация токов и напряжений различных последовательностей при несимметричных коротких замыканиях	178
16. Комплексные схемы замещения для исследования различных видов несимметричных коротких замыканий	181
17. Расчет переходного процесса при продольной несимметрии	184
17.1. Разрыв одной фазы	188
17.2. Разрыв двух фаз	190
18. Порядок расчета однократной продольной несимметрии	192
19. Общий порядок расчета сложных видов повреждений	193
20. Простое замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью	197
21. Расчет токов короткого замыкания в установках напряжением до 1000 В.....	201
22. Расчет переходных процессов с учетом качаний синхронных машин.....	203
23. Качество электромагнитных переходных процессов	207
24. Способы и технические средства ограничения токов короткого замыкания	210
Библиографический список.....	213

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электромагнитные переходные процессы» является одной из профилирующих для всех электроэнергетических специальностей. Она возникла в 30-е годы прошлого столетия – в годы реализации плана ГОЭЛРО. Основателями данного курса явились в СССР – Горев А. А., Ульянов С. А., Круг К. А., Щедрин Н. Н., Миконянц Л. Г., Маркович И. М., за рубежом – К. Парк, Э. Кларк, Р. Рюденберг, Р. Эванс.

Переходные процессы (ПП) возникают в электроэнергетических системах как при нормальной эксплуатации (включение/отключение нагрузок, источников питания, отдельных частей электроэнергетической системы (ЭЭС)), так и в аварийных условиях (короткое замыкание (КЗ), обрыв нагруженной цепи, выпадение электрических машин из синхронизма).

Переходные процессы в ЭЭС – процесс перехода от одного установившегося режима работы электроустановки к другому.

Все переходные процессы в ЭЭС существенно влияют на выбор структуры схемы, выявление условий работы ЭЭС в аварийных режимах, выбор средств управления, регулирования, защиты и противоаварийной автоматики.

Электрооборудование, предназначенное для работы в электроустановках, выбирается в два этапа. Первый этап – по параметрам длительного режима, включая допустимые перегрузки. Вторым этапом – проверка выбранного оборудования по условиям его работы при электромагнитных переходных режимах, определяющими из которых являются *короткие замыкания*.

Целью изучения электромагнитных переходных процессов является:

- формирование необходимых знаний о причинах возникновения и физической сущности этих процессов;
- разработка практических методов их количественной оценки;
- предвидение опасных последствий и умение заранее их предотвратить.

При любом переходном процессе изменяется электромагнитное состояние элементов системы и нарушается баланс между механическим моментом на валу каждой вращающейся машины и элек-

тромагнитным моментом, то есть некоторые машины тормозятся, а некоторые ускоряются.

Из сказанного следует, что переходные процессы можно разделить на две составляющие:

- электромагнитный ПП;
- электромеханический ПП.

Они взаимосвязаны и представляют единое целое.

В силу большой инерции вращающихся частей машин начальная стадия ПП характеризуется преимущественно электромагнитными изменениями.

При относительно малых возмущениях (например, КЗ за большим сопротивлением или, как говорят, при большой удаленности КЗ) весь переходный процесс практически можно рассматривать только как электромагнитный, то есть в этом случае при большой электрической удаленности представляется возможным и целесообразным рассматривать только одну сторону переходного процесса, а именно явления электромагнитного характера.

Электромагнитный переходный процесс характеризуется изменением значений только электромагнитных величин электроустановки (тока, напряжения, частоты и т. д.)

При возникновении ПП в ЭЭС, он одновременно протекает в источниках питания, электрических сетях, нагрузках. При этом в источниках питания приходят в действие автоматические регулирующие устройства, например, автоматическое регулирование возбуждения (АРВ), и поэтому напряжения всех источников питания являются переменными величинами.

Материал данного курса используется при изучении специальных дисциплин: «Электрические системы и их устойчивость», «Электрическая часть электрических станций и подстанций», «Релейная защита и автоматика» (РЗА), «Электроснабжение». В свою очередь при изучении первой части данного курса используется материал, изученный в курсах высшей математики, теоретических основ электротехники (ТОЭ), электрических машин, электрических сетей.

Практические задачи, при решении которых инженер-энергетик сталкивается с необходимостью количественной оценки тех или иных величин при электромагнитных ПП, разнообразны, но они объединены целью обеспечения надежности работы отдельных элементов и всей электроэнергетической системы в целом.

Теоретические разработки и практические методы расчета всегда требуют экспериментальной проверки. Помощь в экспериментах и проверке новых теоретических разработок оказывает математическое и физическое моделирование. Применение персональных компьютеров значительно расширяет возможности математического моделирования.

Авторы выражают благодарность за оказанную помощь в наборе и оформлении рукописи студентке энергетического факультета группы 10601112 Баран А. Г.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

1.1. Основные понятия и определения

Нормальный режим работы электроэнергетической системы характеризуется балансом мощностей и постоянством параметров режима (напряжений, токов, частоты, углов сдвига фаз) или незначительным их отклонением в допустимых пределах, регламентированных нормативными документами.

Переходный процесс (аварийный режим) характеризуется значительными изменениями параметров режима, а также значительным изменением скорости изменения режимных параметров.

Чаще всего такое состояние в ЭЭС возникает при КЗ.

Коротким замыканием является всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в системах с глухозаземленной нейтралью (или четырехпроводной) – замыкание одной или нескольких фаз на землю (или на нулевой провод).

В сетях с изолированной нейтралью или нейтралью, заземленной через специальные компенсирующие устройства, замыкание одной из фаз на землю называют *простым замыканием*. В этом случае в сети протекает не ток КЗ, а ток замыкания на землю, величина которого в основном обусловлена емкостью сети по отношению к земле.

В месте КЗ, как правило, горит *электрическая дуга*, которая характеризуется некоторым активным сопротивлением R_d , величина которого зависит от величины тока и длины дуги. С уменьшением тока и увеличением длины дуги ее сопротивление возрастает.

В ряде случаев эти сопротивления могут быть столь малы, что ими практически можно пренебречь. КЗ, при которых $R_d \rightarrow 0$, называют *металлическими*.

В этом случае имеет место наибольшее значение тока КЗ при прочих равных условиях.

В трехфазных системах имеют место следующие виды КЗ:

- трехфазное $K^{(3)}$;
- двухфазное $K^{(2)}$;
- однофазное $K^{(1)}$;

– двухфазное на землю, то есть замыкание между двумя фазами с одновременным замыканием этой точки на землю $K^{(1,1)}$.

Первые два вида КЗ (рис. 1.1, $a-z$) имеют место как в сетях с глухозаземленной нейтралью, так и в сетях с изолированной нейтралью. Трехфазное КЗ является симметричным, так как все фазы электроустановки находятся в одинаковых условиях.

Остальные повреждения являются несимметричными, так как при них фазы находятся в неодинаковых условиях.

Виды повреждений, которые сопровождаются многократной несимметрией (замыкание различных фаз в различных точках одновременно или замыкание фазы и обрыв другой), называют *сложными* видами повреждений. Следует отметить, что в процессе развития аварии первоначальный вид КЗ переходит в другой вид КЗ. Так, в трехжильных кабельных сетях несимметричные КЗ или простые замыкания часто переходят в трехфазное КЗ, так как образовавшаяся в начале электрическая дуга в месте повреждения разрушает изоляцию между жилами кабеля.

Несимметричные КЗ представляют собой различные *виды поперечной* несимметрии.

Нарушение симметрии какого-либо элемента трехфазной цепи (отключение или разрыв одной или двух фаз ЛЭП) называют *продольной* несимметрией.

Установлено, что большая часть возникающих повреждений носит проходящий характер, то есть повреждения самоустраняются и поэтому если отключенную часть схемы включить обратно, то восстанавливается нормальный режим работы системы. В соответствии с этим широкое применение нашло *автоматическое повторное включение* (АПВ) цепей и особенно воздушных линий.

Короткие замыкания характеризуются не только резким увеличением тока, но и снижением напряжения во всех точках схемы. Особенно резко снижается напряжение в точке КЗ.

С целью поднятия напряжения до нормального значения даже в аварийном режиме сети на генераторах устанавливают специальные устройства *автоматического регулирования возбуждения*.

Переходный процесс в электрической сети, в которой установлены генераторы с АРВ, отличается от переходного процесса при КЗ в сети с генераторами без АРВ. Здесь на переходный процесс,

обусловленный КЗ, накладывается переходный процесс в системе возбуждения синхронного генератора (СГ).

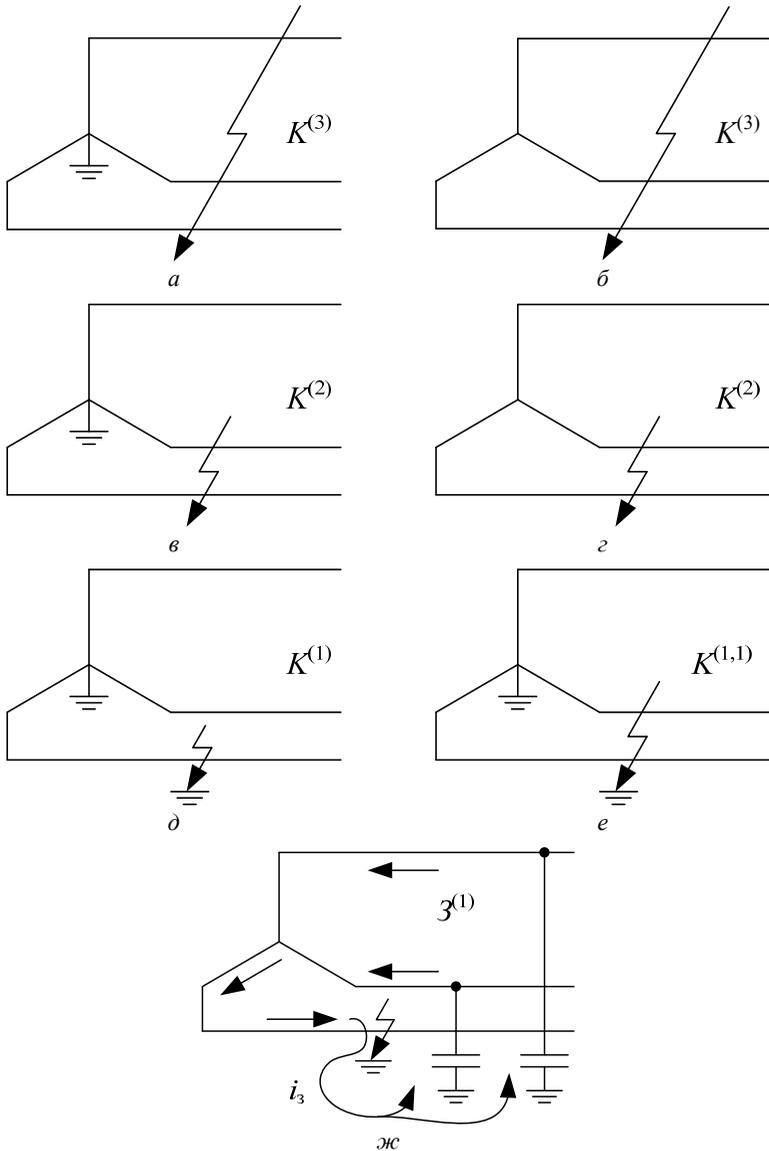


Рис. 1.1. Виды замыканий в трехфазной системе

Ток возбуждения синхронной машины системой АВВ не может подниматься бесконечно. Он ограничен предельным или потолочным значением. Связано это с температурным режимом обмотки возбуждения и исчезновением эффекта регулирования за счет насыщения магнитной системы генератора.

Для современных турбогенераторов кратность предельного тока возбуждения $I_{*в пр} \approx 4$, для гидрогенераторов $I_{*в пр} \approx 3-3,5$.

Для иллюстрации КЗ рассмотрим типичные осциллограммы тока при отсутствии и наличии АВВ (рис. 1.2).

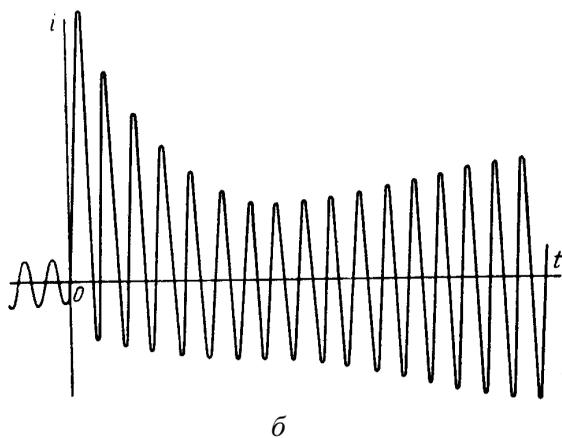
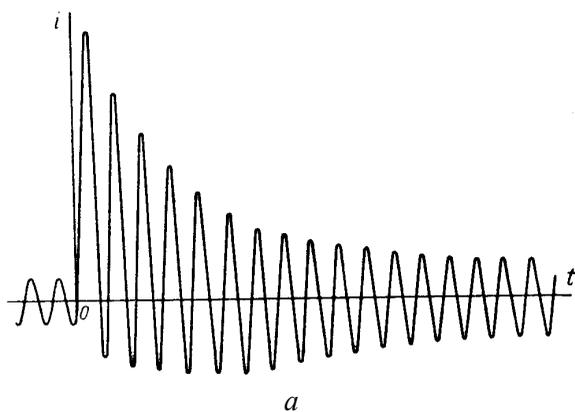


Рис. 1.2

В начальной стадии переходного процесса обе осциллограммы практически одинаковы, так как их характер определяется только лишь затуханием свободных токов, а увеличение тока возбуждения от действия АРВ в силу магнитной инерции практически отсутствует.

В дальнейшем при отсутствии АРВ, по мере затухания свободного тока, кривая переходит в синусоидальную нового установившегося режима.

При наличии АРВ амплитуда тока вновь возрастает, стремясь к установившемуся режиму, который естественно будет больше, чем при отсутствии АРВ.

1.2. Причины возникновения переходных процессов и их последствия

Причинами переходных процессов в электроэнергетических системах являются:

- включения, отключения и переключения источников электрической энергии, трансформаторов, ЛЭП, электроприемников и других элементов;
- появление несимметрии токов и напряжений в результате обрывов фаз ЛЭП, отключения отдельных фаз, несимметричных изменений нагрузки;
- внезапные набросы и сбросы нагрузки;
- форсировка и расфорсировка возбуждения синхронных генераторов;
- асинхронный ход синхронных машин после выпадения из синхронизма;
- АПВ короткозамкнутых цепей;
- атмосферно-климатические воздействия на элементы электрической системы;
- *основной причиной возникновения переходных процессов являются короткие замыкания.*

Последние, в свою очередь, являются результатом нарушения изоляции электрического оборудования.

Причинами нарушения изоляции электрического оборудования являются:

- естественное старение изоляции и потеря ею своих свойств;
- механические повреждения изоляции при производстве работ;

- возникновение КЗ за счет перекрытия изоляции перенапряжениями, возникающими при атмосферно-климатических воздействиях;
- преднамеренные КЗ, вызываемые действием установленных короткозамыкателей (рис. 1.3).

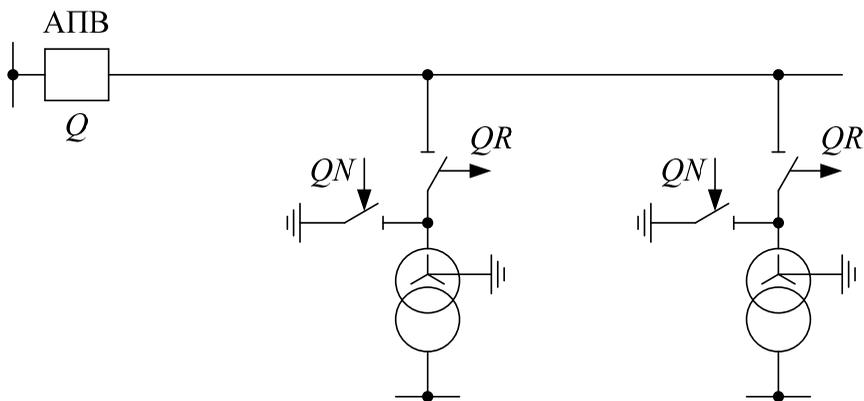


Рис 1.3

В зависимости от места возникновения и продолжительности повреждения его последствия могут иметь местный характер или, наоборот, могут отражаться на всей системе.

Основные негативные последствия КЗ:

- снижение сопротивления электрической сети и увеличение тока до максимума, снижение напряжения в узлах электрической сети;
- динамическое воздействие (механические усилия) на токоведущие части электроустановок, генераторы, электрические аппараты, нагрузки и т. д.;
- термическое воздействие на токоведущие части, электрические машины, аппараты и их изоляцию;
- нарушение бесперебойного электроснабжения потребителей. Существуют производства, которые вообще не допускают перерывов в подаче электроэнергии (1 категория);
- снижение электромагнитного момента на валу электродвигателей за счет снижения напряжения, что влечет снижение производительности машин и механизмов;
- нарушение параллельной работы генераторов энергосистемы;
- помехи в линиях связи, радио- и телепомехи при несимметричных КЗ.

Если своевременно не отключить КЗ, может произойти нарушение устойчивости электрической системы, что является наиболее опасным последствием КЗ.

1.3. Назначение расчетов и требования к ним

Под расчетом электромагнитного переходного процесса понимают определение токов и напряжений в рассматриваемой схеме при заданных условиях. В зависимости от назначения такого расчета определяют указанные величины для заданного момента времени или находят их изменение в течение всего переходного процесса.

К числу задач, для практического решения которых такие расчеты производят, относятся:

а) оценка, выбор, сопоставление схемы электрических соединений как отдельных электроустановок (электрических станций, подстанций), так и системы в целом;

б) выбор коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей) токоведущих частей (сборных шин, проводников) и их проверка по условиям работы при КЗ;

в) выбор, проектирование и настройка устройств релейной защиты и автоматики;

г) выбор системы форсировки и расфорсировки возбуждения, а также системы гашения поля ротора СГ;

д) расчет числа заземленных нейтралей и их мест размещения в энергосистеме;

е) выбор числа и мощности дугогасительных реакторов (ДР);

ж) расчет помех на радио- и телесвязь;

з) проектирование и проверка рабочих и защитных заземлений электроустановок;

и) выбор характеристик разрядников и ограничителей перенапряжений (ОПН) для защиты изоляции электроустановок от перенапряжений;

к) анализ причин и последствий аварий;

л) разработка мероприятий по координации и оптимизации значений токов КЗ.

Требования, предъявляемые к точности расчетов переходных процессов, зависят от назначения расчетов.

2. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ

2.1. Основные допущения

Расчет электромагнитного переходного процесса с учетом всех имеющихся место условий и факторов чрезвычайно сложен и практически невозможен. Поэтому, чтобы упростить задачу и сделать ее решение практически возможным, вводят ряд допущений. Причем допущения, которые пригодны при решении одной задачи, могут быть совершенно неприемлемыми при решении другой.

Основные допущения принимают при решении большинства практических задач, связанных с определением токов и напряжений при КЗ.

К их числу следует отнести:

а) отсутствие насыщения магнитной системы генераторов и трансформаторов. Это дает возможность заменить нелинейные дифференциальные уравнения линейными;

б) пренебрежение токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов. Это позволяет перейти от Т-образной схемы замещения к схеме замещения с одним сопротивлением;

в) отсутствие фазового сдвига между ЭДС генерирующих источников. Это дает возможность перейти от комплексных (векторных) величин к скалярным;

г) пренебрежение активными сопротивлениями при определении токов и напряжений в сетях 35 кВ и выше, при этом учитываются только реактивные сопротивления, то есть $Z \approx X$. В тех случаях, когда расчет производится для протяженной кабельной или воздушной сети напряжением 6–10 кВ с небольшими сечениями проводников (особенно ЛЭП со стальными проводниками), а также для электроустановок напряжением до 1 кВ, данное допущение непригодно;

д) пренебрежение емкостными проводимостями фаз по отношению к земле, за исключением случая рассмотрения простых замыканий на землю, так как в этом случае ток замыкается именно через емкостные проводимости;

е) сохранение симметрии трехфазной системы во всех точках схемы, за исключением места повреждения при несимметричных КЗ;

ж) приближенный учет нагрузок. Они учитываются приближенно, постоянными параметрами, зависящими от стадии переходного процесса;

з) отсутствие качаний синхронных машин. Однако при возникновении существенных качаний или выпадении машин из синхронизма, достаточно надежный результат может быть получен лишь с учетом такого процесса.

2.2. Система относительных единиц

Представление любых физических величин не в именованных единицах, а в относительных, безразмерных единицах, позволяет существенно упростить некоторые теоретические выкладки и придать им более общий характер. Применение системы относительных единиц в практических расчетах токов короткого замыкания придает результатам большую наглядность и позволяет быстрее ориентироваться в порядке определенных значений.

Под относительным значением какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, принятой за базисную или основную.

$$A_{*6} = \frac{A}{A_6}. \quad (2.1)$$

Если за базисный ток I_6 и напряжение U_6 принять некоторые произвольные величины, то базисная мощность системы:

$$S_6 = \sqrt{3}U_6I_6, \quad (2.2)$$

а базисное сопротивление

$$Z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3}I_6} = \frac{U_6^2}{S_6}. \quad (2.3)$$

Таким образом, из четырех базисных величин две могут быть выбраны произвольно, а две другие получаются из приведенных соотношений.

При выбранных базисных условиях относительные значения E, U, I, S, Z будут определяться

$$E_{*6} = \frac{E}{U_6}; \quad (2.4)$$

$$U_{*6} = \frac{U}{U_6}; \quad (2.5)$$

$$I_{*6} = \frac{I}{I_6}; \quad (2.6)$$

$$S_{*6} = \frac{S}{S_6}; \quad (2.7)$$

$$Z_{*6} = \frac{Z}{Z_6}, \quad (2.8)$$

где звездочка указывает, что величина выбрана в относительных единицах, а индекс «б» – что она приведена к базисным условиям.

Используя выражение (2.3), определение относительного сопротивления по (2.8) можно представить в ином виде:

$$Z_{*6} = \frac{Z}{Z_6} = \frac{Z\sqrt{3}I_6}{U_6} \quad (2.9)$$

или

$$Z_{*6} = Z \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (2.10)$$

где Z – заданное сопротивление в Омах на фазу;

I_6 – базисный ток, кА;

U_6 – базисное линейное напряжение, кВ;

S_6 – базисная мощность, МВА.

Поскольку выбор базисных условий произволен, то одна и та же действительная величина может иметь различные значения в относительных единицах.

Обычно относительные значения параметров элементов энергосистемы (генераторов, трансформаторов, реакторов) задаются в справочниках при номинальных условиях (то есть при U_H , I_H , S_H). Их величины определяются по выражениям (2.4)–(2.10), где базисные единицы должны быть заменены соответствующими номинальными, то есть:

$$E_{*H} = \frac{E}{U_H};$$

$$U_{*H} = \frac{U}{U_H};$$

$$I_{*H} = \frac{I}{I_H};$$

$$S_{*H} = \frac{S}{S_H};$$

$$Z_{*H} = \frac{Z}{Z_H};$$

$$Z_{*H} = \frac{Z\sqrt{3}I_H}{U_H};$$

$$Z_{*H} = \frac{ZS_H}{U_H^2}.$$

Для выполнения расчета в относительных единицах необходимо все ЭДС источников питания и сопротивления элементов схемы выразить в относительных единицах при выбранных базисных условиях.

Если они заданы в именованных единицах, то необходимо воспользоваться выражениями (2.4), (2.9) или (2.10), а если они заданы в относительных единицах при номинальных условиях, то их следует пересчитать по следующим выражениям:

$$E_{*6} = E_{*H} \frac{U_H}{U_6}; \quad (2.11)$$

$$Z_{*6} = Z_{*H} \frac{I_6 U_H}{I_H U_6} \quad (2.12)$$

или

$$Z_{*6} = Z_{*H} \frac{S_6 U_H^2}{S_H U_6^2}. \quad (2.13)$$

При выборе базисных условий следует руководствоваться соображениями упрощения вычислительного процесса, а также наглядностью полученных результатов.

За базисную мощность удобно брать целое число, кратное десяти (1000, 100 МВА), или часто повторяющуюся в схеме номинальную мощность (или кратную ей).

За базисное напряжение рекомендуется принимать U_H или близкое к нему.

$$\text{При } U_6 = U_H, \quad E_{*6} = E_{*H}, \quad \text{а } Z_{*6} = Z_{*H} \frac{S_6}{S_H}.$$

2.3. Составление схемы замещения

Схема замещения электроэнергетической системы составляется на основе ее расчетной схемы для определенной стадии переходного процесса.

Для упрощения расчетов такую схему следует представить в виде эквивалентной электрической схемы замещения.

Из электротехники известно, что составление такой схемы замещения сводится к приведению параметров элементов и ЭДС источников различных ступеней напряжений схемы к одной ступени, выбранной за основную (базисную).

Электрическая система представляет собой совокупность частей, состоящих из генераторов, линий электропередач, связанных между собой трансформаторами, то есть отдельные элементы системы связаны между собой не электрически, а магнитно (рис. 2.1).

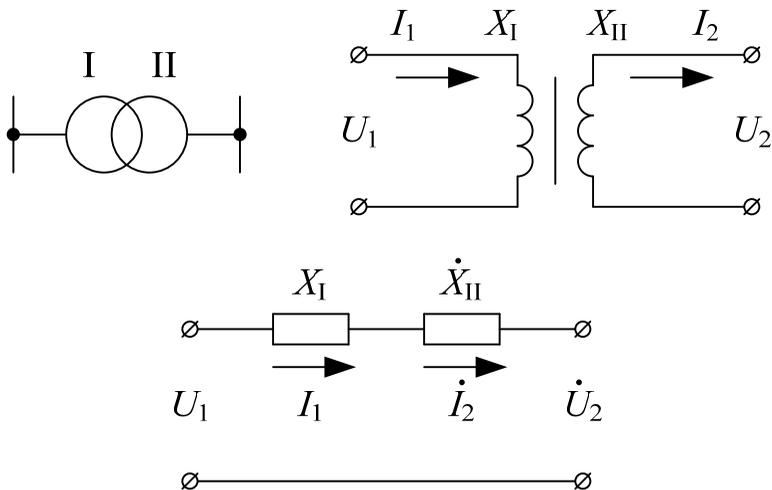


Рис. 2.1

Приведение к одной ступени напряжения осуществляется на основе соотношений, которые вытекают из известной теории трансформатора:

$$\dot{U}_2 = U_2 K_T; \quad \dot{i}_2 = \frac{I_2}{K_T}, \quad \dot{X}_{II} = X_{II} K_T^2. \quad (2.14)$$

Под коэффициентом трансформации K_T понимают отношение линейного напряжения стороны, к которой приводятся параметры, к линейному напряжению стороны, параметры которой приводятся:

$$K_T = \frac{U_1}{U_2}.$$

Существует два способа приведения параметров элементов схем к одной ступени напряжения: точный и приближенный. Рассмотрим каждый из них.

1. Точное приведение параметров в многократно связанной магнитной системе (рис. 2.2).

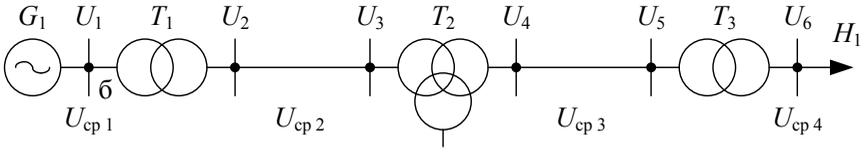


Рис. 2.2

За базисную ступень примем первую ступень $U_1 = U_{\bar{6}}$.

Запишем, как определяются параметры нагрузки, подключенной на конкретной ступени при точном приведении их к основной (базисной) ступени.

$$\overset{\circ}{E} = EK_{T3}K_{T2}K_{T1} = E \frac{U_5}{U_6} \frac{U_3}{U_4} \frac{U_1}{U_2}; \quad (2.15)$$

$$\overset{\circ}{U} = UK_{T3}K_{T2}K_{T1} = U \frac{U_5}{U_6} \frac{U_3}{U_4} \frac{U_1}{U_2}; \quad (2.16)$$

$$\overset{\circ}{I} = \frac{I}{K_{T3}K_{T2}K_{T1}}; \quad (2.17)$$

$$\overset{\circ}{X} = XK_{T3}^2 K_{T2}^2 K_{T1}^2 = X \left(\frac{U_5}{U_6} \frac{U_3}{U_4} \frac{U_1}{U_2} \right)^2. \quad (2.18)$$

Для того чтобы выразить эти величины в относительных единицах при выбранных базисных условиях, воспользуемся выражениями (2.4), (2.5), (2.10), (2.13):

$$\overset{\circ}{E}_{*\bar{6}} = \frac{\overset{\circ}{E}}{U_{\bar{6}}} = \frac{EK_{T3}K_{T2}K_{T1}}{U_{\bar{6}}} = \frac{E}{U_{\bar{6}}}, \quad (2.19)$$

где $\overset{\circ}{U}_{\bar{6}} = \frac{U_{\bar{6}}}{K_{T3}K_{T2}K_{T1}}$ – приведенное базисное напряжение,

$$\overset{\circ}{U}_{*6} = \frac{\overset{\circ}{U}_6}{U_6} = \frac{UK_{T3}K_{T2}K_{T1}}{U_6} = \frac{U}{\overset{\circ}{U}_6}, \quad (2.20)$$

◦ – символ означает, что данная величина является приведенной.

$$\overset{\circ}{I}_{*6} = \frac{\overset{\circ}{I}}{I_6} = \frac{I}{I_6 K_{T3} K_{T2} K_{T1}} = \frac{I}{\overset{\circ}{I}_6}, \quad (2.21)$$

где $\overset{\circ}{I}_6 = I_6 (K_{T3} K_{T2} K_{T1})$ – приведенный базисный ток.

$$\overset{\circ}{X}_{*6} = \frac{\overset{\circ}{X}}{X_6} = \frac{\overset{\circ}{X} S_6}{U_6^2} = X (K_{T3} K_{T2} K_{T1})^2 \frac{S_6}{U_6^2} = X \frac{S_6}{\overset{\circ}{U}_6^2}; \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{X}_{*6} &= \overset{\circ}{X}_{*н} \frac{S_6 U_н^2}{S_н U_6^2} = X_{*н} (K_{T3} K_{T2} K_{T1})^2 \frac{S_6 U_н^2}{S_н U_6^2} = \\ &= X_{*н} \frac{S_6 U_н^2}{S_н \overset{\circ}{U}_6^2}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Из приведенных выражений следует, что истинные величины должны быть пересчитаны столько раз, сколько имеется трансформаторов на пути между приводимой ступенью и принятой за основную.

2. Приближенное приведение.

В практических расчетах применяют приближенное приведение, позволяющее значительно проще и быстрее получить приближенную схему замещения. Сущность такого приведения в следующем.

Для каждой ступени напряжения устанавливают среднее номинальное напряжение $U_{cp} = U_н + 5\%U_н$, а именно 515; 340; 230; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15 кВ, и при этом условно считают, что номинальные напряжения всех элементов, находящихся на одной ступени, одинаковы и равны соответствующим значениям по указанной шкале.

В этом случае:

$$\begin{aligned}\overset{\circ}{E} &= EK_{T3}K_{T2}K_{T1} = E \frac{U_{cp3}}{U_{cp4}} \frac{U_{cp2}}{U_{cp3}} \frac{U_{cp1}}{U_{cp2}} = \\ &= E \frac{U_{cp1}}{U_{cp4}} = E \frac{U_{cp16}}{U_{cp4н}};\end{aligned}\quad (2.24)$$

$$\overset{\circ}{U} = U \frac{U_{cp16}}{U_{cp4н}}; \quad \overset{\circ}{I} = I \frac{U_{cp4}}{U_{cp1}} = I \frac{U_{cp4н}}{U_{cp16}};\quad (2.25)$$

$$\overset{\circ}{X} = X \frac{U_{cp1}^2}{U_{cp4}^2} = X \frac{U_{cp16}^2}{U_{cp4н}^2}; \quad \overset{\circ}{X}_{*н} = X_{*н} \frac{U_{cp16}^2}{U_{cp4н}^2}.\quad (2.26)$$

Или в относительных единицах, приведенных к базисным условиям:

$$\begin{aligned}E_{*6} &= \frac{\overset{\circ}{E}}{U_{cp16}} = E \frac{U_{cp16}}{U_{cp4н}U_{cp16}} = \frac{E}{U_{cp4н}} = E_{*н}, \\ &\text{то есть } E_{*6} = E_{*н};\end{aligned}\quad (2.27)$$

$$U_{*6} = \frac{\overset{\circ}{U}}{U_{cp16}} = U \frac{U_{cp16}}{U_{cp4н}U_{cp16}} = \frac{U}{U_{cp4н}} = U_{*н};\quad (2.28)$$

$$\begin{aligned}X_{*6} &= \frac{\overset{\circ}{X}}{X_6} = \overset{\circ}{X} \frac{S_6}{U_{cp16}^2} = X \frac{U_{cp16}^2 S_6}{U_{cp4н}^2 U_{cp16}^2} = X \frac{S_6}{U_{cp4н}^2}; \\ &X_{*6} = X \frac{S_6}{U_{cp}^2};\end{aligned}\quad (2.29)$$

$$X_{*6} = X_{*н} \frac{S_6 U_H^2}{S_H U_6^2} = X_{*н} \frac{U_{ср16}^2 S_6 U_{ср4н}^2}{U_{ср4н}^2 S_H U_{ср16}^2} = X_{*н} \frac{S_6}{S_H}; \quad (2.30)$$

$$X_{*6} = X_{*н} \frac{S_6}{S_H}.$$

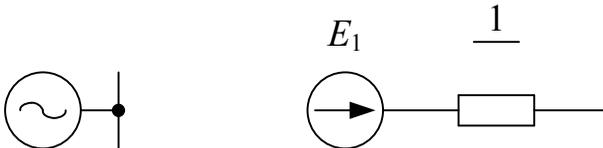
В практических расчетах чаще всего пользуются приближенным способом приведения параметров. Поэтому для представления элементов схемы замещения в относительных единицах задаются базисной мощностью S_6 , в качестве U_6 принимают $U_{ср}$ на каждой ступени и рассчитывают $I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{ср}}$ для всех ступеней.

Каждый элемент расчетной схемы замещается эквивалентным индуктивным сопротивлением, приведенным к базисным условиям и выраженным в относительных единицах, а для генераторов и нагрузок определяется, кроме этого, и ЭДС.

Электрическая схема замещения (далее схема замещения) расчетной схемы представляет собой однолинейную схему, в которой все элементы исходной схемы представлены своими сопротивлениями, приведенными к базисным условиям, а генераторы и нагрузки также и ЭДС.

Сопротивления на схеме обозначаются дробью, в числителе которой указывается порядковый номер сопротивления, а в знаменателе – его численное значение при принятых базисных условиях. Значения ЭДС активных элементов также наносят на схему с присвоением им порядковых номеров.

1. Генератор



$$E_1 = E_*, \quad X_1 = X_{*6} = X_{*н} \frac{S_6}{S_H}. \quad (2.31)$$

Величина E_* зависит от стадии переходного процесса.

X_{*H} – величина сопротивления генератора в относительных единицах при номинальных параметрах, которым он характеризуется в зависимости от стадии переходного процесса.

S_{HT} – номинальная мощность генератора, МВА.

2. Двухобмоточный трансформатор

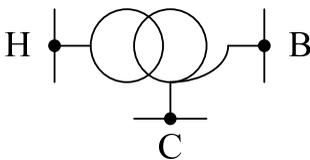
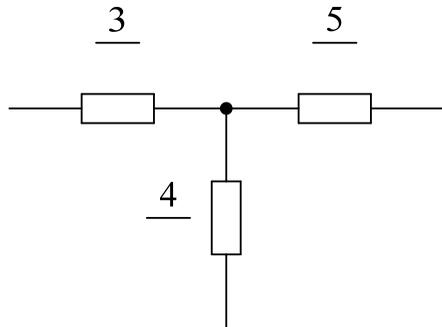
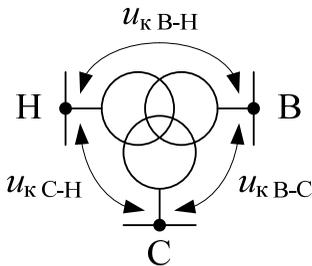


$$X_2 = X_{*6} = \frac{u_k \% S_6}{100 S_{HT}}, \quad (2.32)$$

где $u_k\%$ – напряжение короткого замыкания, %;

S_{HT} – полная номинальная мощность трансформатора, МВА.

3. Трехобмоточный трансформатор, автотрансформатор



$$X_3 = X_{*H\bar{6}} = \frac{u_{кН} \% S_{\bar{6}}}{100 S_H},$$

$$X_4 = X_{*C\bar{6}} = \frac{u_{кC} \% S_{\bar{6}}}{100 S_H},$$

$$X_5 = X_{*B\bar{6}} = \frac{u_{кВ} \% S_{\bar{6}}}{100 S_H},$$

т. е.

$$X_i = X_{*i\bar{6}} = \frac{u_{ки} \% S_{\bar{6}}}{100 S_H}, \quad (2.33)$$

где

$$i = H, C, B,$$

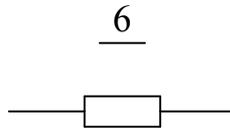
$$u_{кВ} \% = 0,5(u_{кВ-Н} \% + u_{кВ-С} \% - u_{кС-Н} \%);$$

$$u_{кC} \% = 0,5(u_{кВ-С} \% + u_{кС-Н} \% - u_{кВ-Н} \%);$$

$$u_{кН} \% = 0,5(u_{кВ-Н} \% + u_{кС-Н} \% - u_{кВ-С} \%).$$

Для обмотки низшего напряжения автотрансформаторов вместо S_H подставляется значение S_{HH} – номинальная мощность низшей обмотки.

4. Реактор



В зависимости от способа задания типа реактора сопротивление реактора, приведенное к базисным условиям, определяется:

а) X_p %, I_H , U_H :

$$X_6 = X_{*рб} = \frac{X_p \%}{100} \frac{I_6}{I_H} \frac{U_H}{U_{cp}}; \quad (2.34)$$

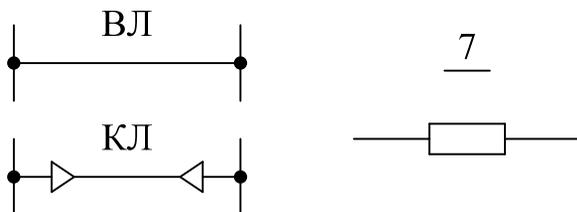
б) X_p , Ом:

$$X_6 = X_{*рб} = X_p \frac{S_6}{U_{cp}^2}, \quad (2.35)$$

где I_6 – базисный ток ступени, на которой включен реактор;

U_{cp} – среднее номинальное напряжение той ступени, на которой включен реактор.

5. Линии электропередач

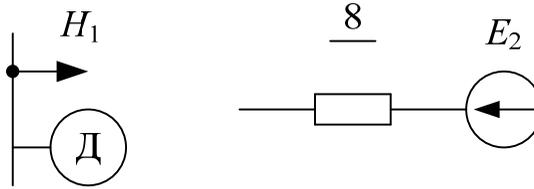


$$X_7 = X_{*лб} = X_0 l \frac{S_6}{U_6^2} = X_0 l \frac{S_6}{U_{cp}^2}, \quad (2.36)$$

где X_0 – удельное индуктивное сопротивление линии электропередач;

l – длина линии, км.

6. Нагрузка



$$X_8 = X_{*нб} = X_{*н} \frac{S_6}{S_{нн}}, \quad E_{*н} = E_2, \quad (2.37)$$

где $E_{*н}$, $X_{*н}$ – ЭДС и сопротивление нагрузки, выраженные в относительных единицах при номинальных данных, зависящие от стадии переходного процесса;

$S_{нн}$ – номинальная мощность нагрузки, МВА.

Пример составления схемы замещения

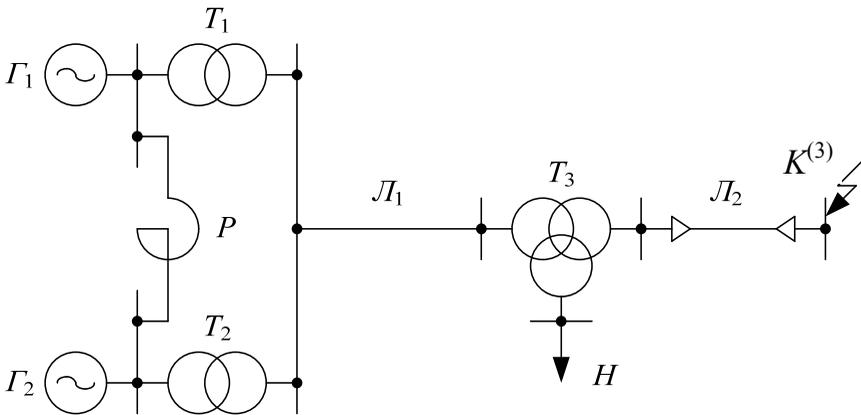


Рис. 2.3. Расчетная схема сети

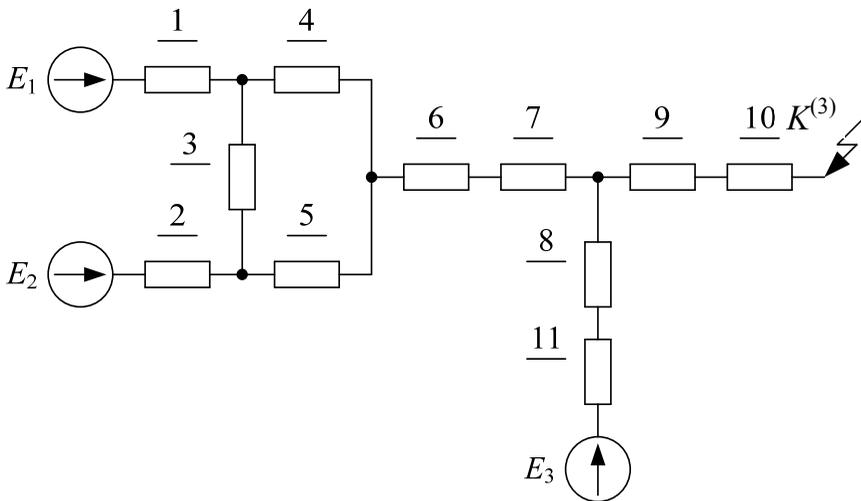


Рис. 2.4. Схема замещения

Задавшись базисными условиями S_0 , $U_0 = U_{cp}$, по приведенным выше формулам определяют сопротивления и ЭДС схемы замещения. Затем исходную схему преобразовывают к виду, изображенному на рис. 2.5.

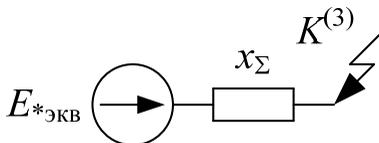


Рис. 2.5

На рис. 2.5 $E^*_{эКВ}$ – эквивалентная (суммарная) ЭДС схемы, а x_{Σ} – суммарное сопротивление схемы.

2.4. Методы преобразования схем замещения

В процессе преобразования схем замещения к простейшему виду используют следующие методы:

1. Последовательное сложение сопротивлений.
2. Параллельное сложение сопротивлений.

3. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду и наоборот:

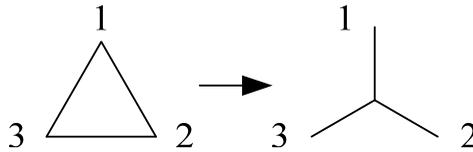


Рис. 2.6

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \frac{X_{12}X_{13}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}; \\
 X_2 &= \frac{X_{12}X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}; \\
 X_3 &= \frac{X_{13}X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}.
 \end{aligned}
 \tag{2.38}$$

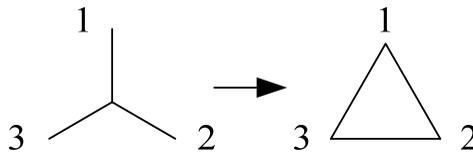


Рис. 2.7

$$\begin{aligned}
 X_{12} &= X_1 + X_2 + \frac{X_1X_2}{X_3}; \\
 X_{13} &= X_1 + X_3 + \frac{X_1X_3}{X_2}; \\
 X_{23} &= X_2 + X_3 + \frac{X_2X_3}{X_1}.
 \end{aligned}
 \tag{2.39}$$

4. Метод эквивалентных ЭДС.

Данным методом пользуются в тех случаях, когда свободные токи в ветвях затухли или же когда постоянные времени затухания свободных токов в каждой ветви одинаковы.

При преобразовании схемы на рис. 2.8, *а* в схему на рис. 2.8, *б* исходят из того, что напряжение в точке А в обоих случаях одинаково, соответственно одинаков ток I в общем сопротивлении. На основании первого закона Кирхгофа для узла А можно записать:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

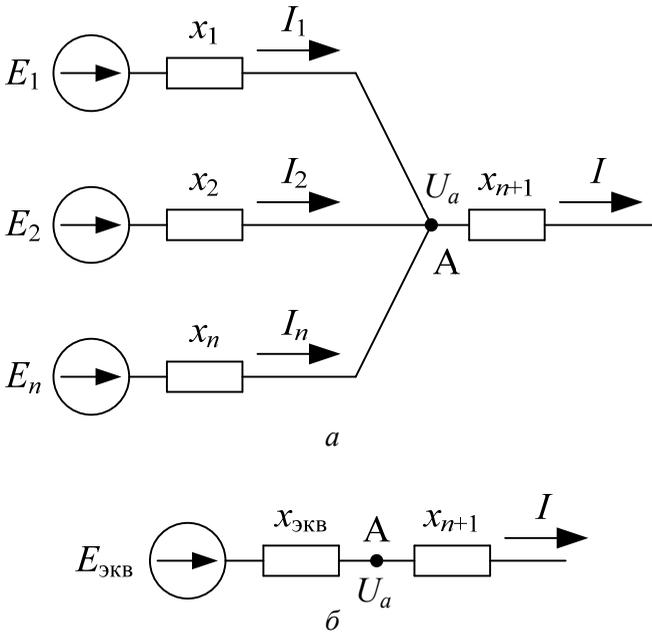


Рис. 2.8

Эти токи можно представить как:

$$I = \frac{E_{\text{ЭКВ}} - U_a}{X_{\text{ЭКВ}}}, \quad I_1 = \frac{E_1 - U_a}{X_1}, \quad I_2 = \frac{E_2 - U_a}{X_2}, \quad I_n = \frac{E_n - U_a}{X_n},$$

тогда

$$\frac{E_{\text{ЭКВ}} - U_a}{X_{\text{ЭКВ}}} = \frac{E_1 - U_a}{X_1} + \frac{E_2 - U_a}{X_2} + \dots + \frac{E_n - U_a}{X_n}.$$

Заменим сопротивления на соответствующие проводимости:

$$E_{\text{ЭКВ}} y_{\text{ЭКВ}} - U_a y_{\text{ЭКВ}} = E_1 y_1 + E_2 y_2 + \dots + E_n y_n - U_a (y_1 + y_2 + \dots + y_n),$$

где

$$y_{\text{ЭКВ}} = y_1 + y_2 + \dots + y_n, \quad E_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_1 y_1 + E_2 y_2 + \dots + E_n y_n}{y_1 + y_2 + \dots + y_n}.$$

Из последнего уравнения получим:

$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i y_i}{\sum_{i=1}^n y_i}, \quad (2.40)$$

$$x_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{y_{\text{ЭКВ}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n y_i}. \quad (2.41)$$

Чаще всего приходится заменять два луча одним эквивалентным (рис. 2.9).

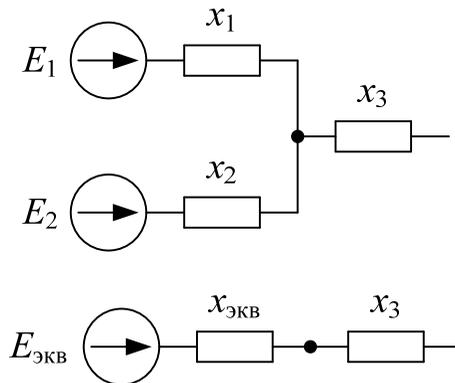


Рис. 2.9

В этом случае

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_1 x_2 + E_2 x_1}{x_1 + x_2}, \quad x_{\text{экв}} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2}. \quad (2.42)$$

5. Метод расщепления узла.

Если генерирующий источник с ЭДС E находится в узле схемы, то при необходимости можно разрезать схему в вершине, где приложена ЭДС, сохранив эту ЭДС на свободных концах ветвей. Величина ЭДС после расщепления остается неизменной (рис. 2.10).

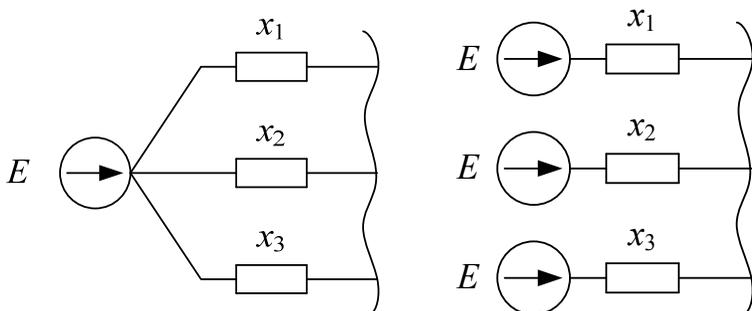


Рис. 2.10

Если точка КЗ находится в узле схемы, то можно разрезать этот узел, при этом на одном из лучей оставляют точку КЗ, а другие лучи рассматривают как нагрузочные с ЭДС, равной нулю (рис. 2.11). При этом определяется ток в той ветви, на которой оставлена точка КЗ. Перемещая точку КЗ по ветвям, находят токи КЗ во всех ветвях, затем, применяя метод наложения, суммируют их и находят ток КЗ в точке K .

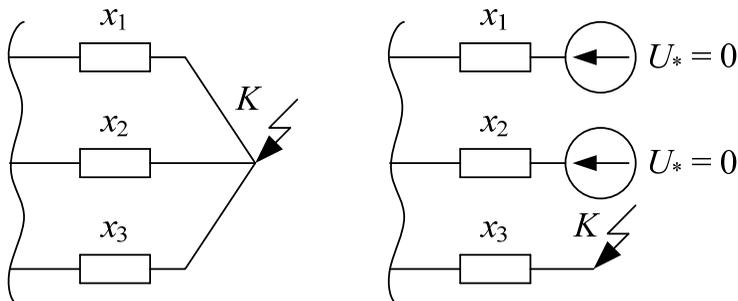


Рис. 2.11

6. Метод наложения (суперпозиции).

Используя этот метод, можно получить действительный режим как результат наложения ряда условных режимов в предположении, что в схеме приложена только одна ЭДС, в то время как все остальные ЭДС равны нулю.

Определяют I_1 при условии наличия E_1 , а остальные ЭДС $E = 0$, затем определяют I_2 при условии наличия E_2 , а остальные ЭДС $E = 0$ и т. д.

Ток КЗ в точке K будет:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

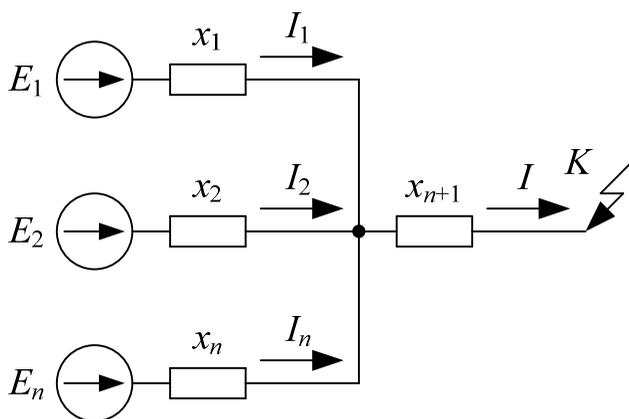


Рис. 2.12

Расчет с применением этого метода получается громоздким.

7. Метод коэффициентов токораспределения.

В процессе решения практических задач возникает необходимость учесть индивидуальные свойства источников питания, а также их разноудаленность на величину тока КЗ. Для этого удобно использовать следующий прием.

Предположим, имеется следующая схема (рис. 2.13).

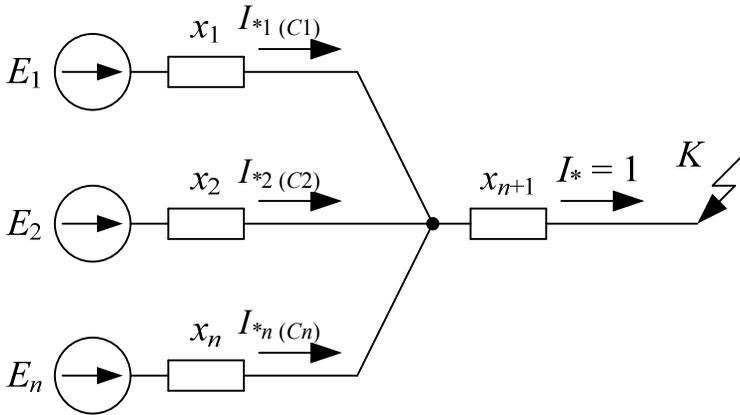


Рис. 2.13

Приняв условно ток в месте КЗ за единицу $I_* = 1$, определяют доли для отдельных источников C_1, C_2, \dots, C_n от общего тока, называемые коэффициентами распределения.

Токи в ветвях пропорциональны проводимостям y , поэтому можно записать, что

$$\frac{C_1}{y_1} = \frac{1}{y_{\text{ЭКВ}}}, \quad \frac{C_2}{y_2} = \frac{1}{y_{\text{ЭКВ}}}, \quad \frac{C_n}{y_n} = \frac{1}{y_{\text{ЭКВ}}}. \quad (2.43)$$

Соответственно

$$C_1 = \frac{y_1}{y_{\text{ЭКВ}}} = \frac{x_{\text{ЭКВ}}}{x_1}, \quad C_2 = \frac{y_2}{y_{\text{ЭКВ}}} = \frac{x_{\text{ЭКВ}}}{x_2}, \quad C_n = \frac{y_n}{y_{\text{ЭКВ}}} = \frac{x_{\text{ЭКВ}}}{x_n}, \quad (2.44)$$

где $y_{\text{ЭКВ}} = y_1 + y_2 + \dots + y_n$

или

$$x_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{y_{\text{ЭКВ}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n y_i}, \quad (2.45)$$

при этом условие проверки коэффициентов токораспределения:

$$C_1 + C_2 + \dots + C_n = 1.$$

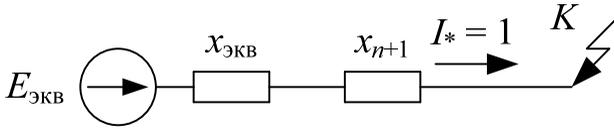


Рис. 2.14

Далее определяют $x_{\Sigma} = x_{\text{ЭКВ}} + x_{n+1}$ и затем распределяют его по отдельным лучам (рис. 2.15) по выражениям

$$x'_1 = \frac{x_{\Sigma}}{C_1}, x'_2 = \frac{x_{\Sigma}}{C_2}, \dots, x'_n = \frac{x_{\Sigma}}{C_n}. \quad (2.46)$$

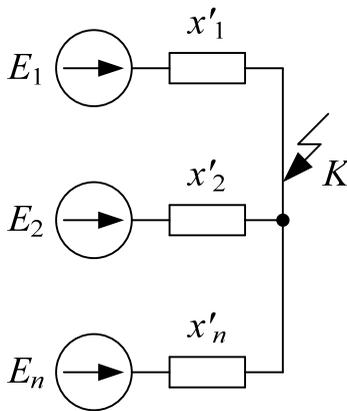


Рис. 2.15

Если этот метод приходится применять в схеме с двумя лучами, то имеют место следующие соотношения:

$$C_1 = \frac{x_2}{x_1 + x_2}, \quad C_2 = \frac{x_1}{x_1 + x_2},$$

$$x_{\text{ЭКВ}} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2}, \quad x_{\Sigma} = x_{\text{ЭКВ}} + x_3,$$

$$x'_1 = \frac{x_\Sigma}{C_1}, \quad x'_2 = \frac{x_\Sigma}{C_2}.$$

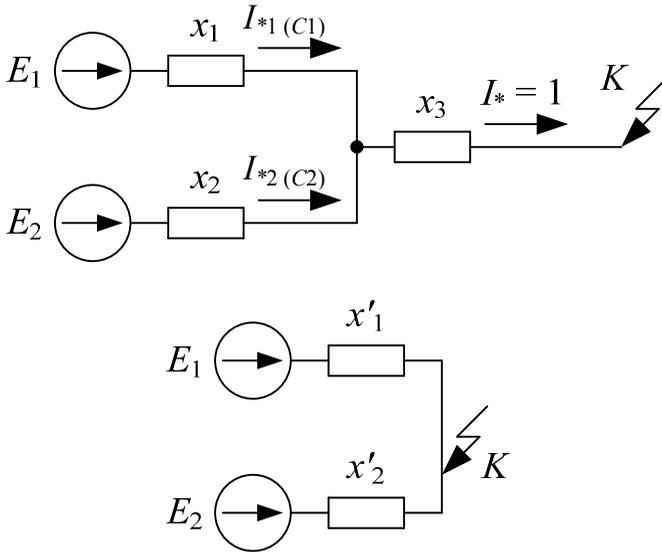


Рис. 2.16

8. В тех случаях, когда в схеме имеет место ось симметрии по отношению к точке КЗ, можно наложить одну часть схемы на вторую относительно этой оси (рис. 2.17).

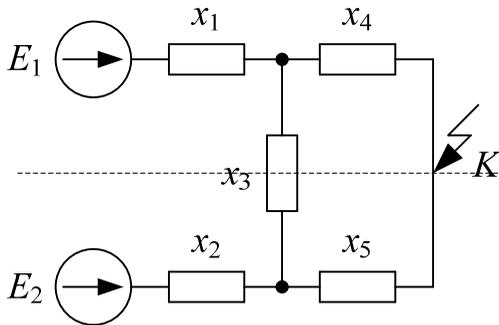
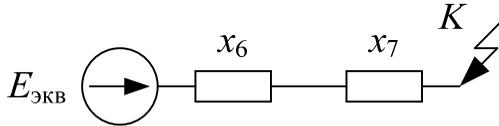


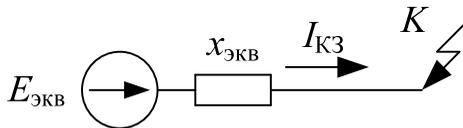
Рис. 2.17

$$\begin{cases} E_1 = E_2; \\ x_4 = x_5, \quad x_1 = x_2; \\ x_7 = \frac{x_4}{2}, \quad x_6 = \frac{x_1}{2}, \quad E_{\text{ЭКВ}} = E_1 = E_2. \end{cases}$$



9. Распределение токов КЗ в отдельных ветвях.

При расчете тока КЗ в точке K приходится также определять токи в отдельных ветвях. В этом случае идут в обратном направлении от результирующих сопротивлений к промежуточным, которые получились при преобразовании схемы (рис. 2.18).



$$I_{\text{КЗ}} = I_{\text{КЗ}2} + I_{\text{КЗ}3};$$

$$\frac{I_{\text{КЗ}2}}{I_{\text{КЗ}3}} = \frac{x_3}{x_2} = \frac{I_{\text{КЗ}} - I_{\text{КЗ}3}}{I_{\text{КЗ}3}}.$$

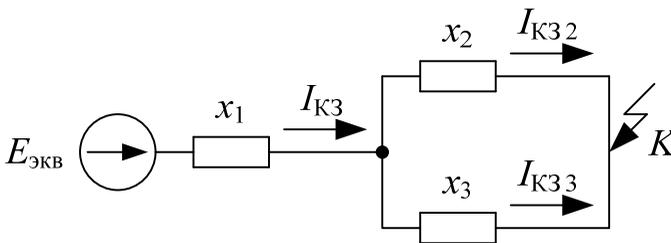


Рис. 2.18

Отсюда

$$I_{\text{КЗ}3} = I_{\text{КЗ}} \frac{x_2}{x_2 + x_3}; \quad I_{\text{КЗ}2} = I_{\text{КЗ}} \frac{x_3}{x_2 + x_3}. \quad (2.47)$$

3. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Под установившимся режимом понимают ту стадию переходного процесса, когда все свободные токи, возникшие в начальный момент, затухли и полностью закончен подъем тока возбуждения АРВ. Практически такая стадия ПП наступает через 3–5 с после начала КЗ.

Такое определение установившегося режима соответствует упрощенному представлению о протекании процесса КЗ, которое в достаточной степени соответствует лишь для одного генератора.

В сложных схемах такой режим маловероятен, то есть переходный процесс носит более сложный характер в связи с тем, что возникают качания, которые часто приводят к выпадению генераторов из синхронизма.

Тем не менее рассмотрение этого режима обусловлено практической необходимостью выяснения пределов изменения отдельных величин.

Если генераторы не снабжены АРВ, то установившийся ток в месте КЗ является наименьшим током при данном аварийном режиме (рис. 3.1). При наличии АРВ на генераторах возможны условия, при которых установившийся ток КЗ превышает токи в предыдущие моменты процесса КЗ и даже начальный ток КЗ (рис. 3.2).

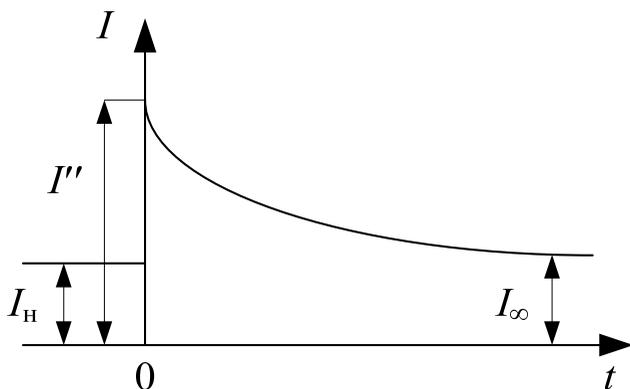


Рис. 3.1. Генератор без АРВ:

I'' — начальный ток КЗ; I_∞ — установившийся ток КЗ

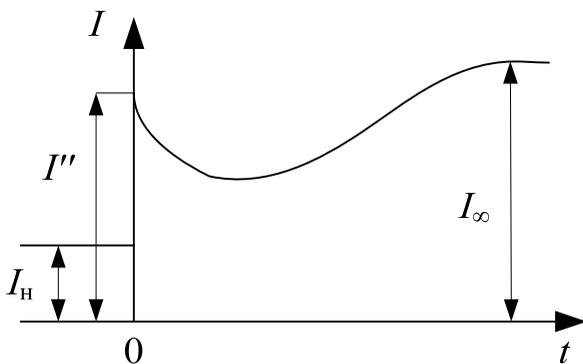


Рис. 3.2. Генератор с АРВ

3.1. Основные характеристики синхронной машины в установившемся режиме трехфазного короткого замыкания

Основными характеристиками и параметрами синхронной машины (СМ), определяющими ее поведение при симметричном установившемся режиме, являются:

1. Характеристика холостого хода (ХХХ) СМ

$$E_{*\infty} = f(I_{*B}),$$

где $E_{*\infty}$ – ЭДС СМ в установившемся режиме КЗ в относительных единицах;

I_{*B} – ток возбуждения СМ в относительных единицах.

2. Характеристика КЗ (ХКЗ) СМ

$$I_{*\infty}^{(3)} = \varphi(I_{*B}),$$

где $I_{*\infty}^{(3)}$ – установившийся ток трехфазного КЗ на выводах СМ в относительных единицах.

3. Синхронная ненасыщенная реактивность по продольной оси статора СМ x_d и сопротивление рассеяния обмотки статора x_s .

4. Предельное значение тока возбуждения $I_{*В пр}$.

Теперь более подробно о каждой характеристике и каждом параметре.

Характеристика XX

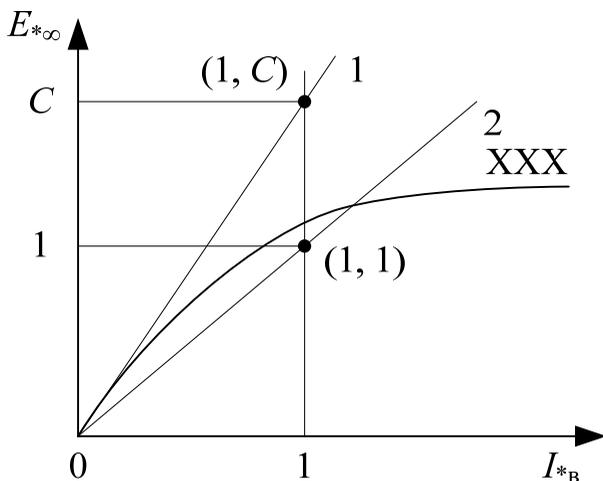


Рис. 3.3. Характеристика XX

Считая магнитную систему СМ ненасыщенной, принимают (используют) два способа спрямления XXX:

а) первый – по касательной к XXX, проходящей через начало координат. В этом случае

$$E_{*∞} = CI_{*В},$$

где C – коэффициент пропорциональности, численно равный относительной ЭДС ненасыщенного генератора при $I_{*В} = 1$.

Для ТГ $C = 1,2$, а для ГГ $C = 1,06$.

За $I_{*В} = 1$ принимают такое значение тока возбуждения, при котором на холостом ходу напряжение на выходах генератора (СМ) равно номинальному.

б) второй – по прямой, проходящей через начало координат и точку с координатами (1,1). В этом случае

$$E_{*\infty} = I_{*B}.$$

Итак, для определения ЭДС СМ в установившемся режиме пользуются тем или иным спрямлением ХХХ.

Характеристика КЗ

Иногда вместо ненасыщенной реактивности по продольной оси x_d может быть задано отношение короткого замыкания K_C , которое представляет собой относительный установившийся ток при трехфазном КЗ на выводах СМ и относительном токе возбуждения, равном единице, $I_{*B} = 1$.

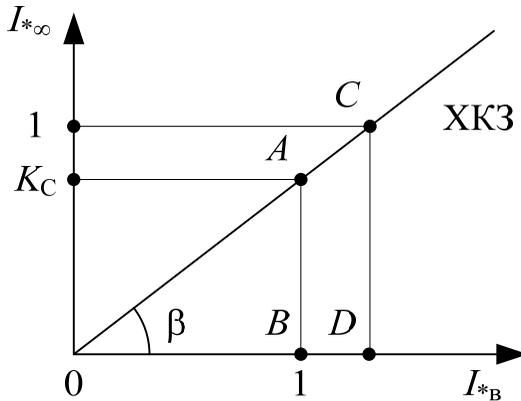


Рис. 3.4. Характеристика КЗ

$$K_C = AB = \frac{AB}{OB} = \operatorname{tg}\beta = I_{*\infty}^{(3)} = \frac{I_{\infty}^{(3)}}{I_H(I_{*B} = 1)};$$

$$I_{*B} = OD = \frac{CD}{\operatorname{tg}\beta} = \frac{1}{K_C};$$

$$CD = I_{*\infty}^{(3)} = OD \operatorname{tg} \beta = I_{*B} K_C.$$

Итак,

$$I_{*B} = \frac{1}{K_C}, \quad I_{*\infty}^{(3)} = I_{*B} K_C. \quad (3.1)$$

Рассмотрим случай КЗ на выводах СМ (рис. 3.5).

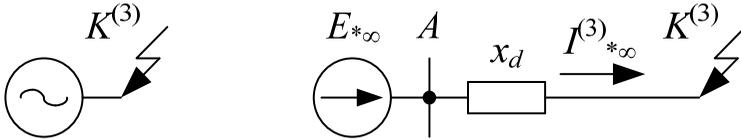


Рис. 3.5

$$E_{*\infty} = U_* + I_{*\infty}^{(3)} x_d.$$

Так как U_* в месте КЗ равно нулю, $U_* = 0$, то

$$x_d = \frac{E_{*\infty}}{I_{*\infty}^{(3)}}.$$

При спрямлении ХХХ по касательной (прямая 1)

$$x_d = \frac{E_{*\infty}}{I_{*\infty}^{(3)}} = \frac{CI_{*B}}{I_{*B}K_C} = \frac{C}{K_C}; \quad (3.2)$$

$$x_d = \frac{C}{K_C}.$$

При спрямлении через точку (1.1) (прямая 2)

$$x_d = \frac{E_{*\infty}}{I_{*\infty}^{(3)}} = \frac{I_{*B}}{I_{*B}K_C} = \frac{1}{K_C}; \quad (3.3)$$

$$x_d = \frac{1}{K_C}.$$

То есть x_d может быть определено через K_C . Среднее значение $K_C = 0,7$ – для ТГ, $K_C = 1,1$ – для ГГ.

С другой стороны, синхронная ненасыщенная реактивность по продольной оси может быть определена как:

$$x_d = x_s + x_{ad},$$

то есть сопротивление СМ в установившемся режиме равно сумме сопротивлений рассеяния обмотки статора СМ x_s и сопротивления, обусловленного реакцией статора на поток ротора по продольной оси x_{ad} .

x_s – сопротивление рассеяния обмотки статора, которое зависит от конструкции машины и для типовых ТГ $x_s = 0,1-0,15$, а для ГГ – $x_s = 0,15-0,25$.

При КЗ снижается напряжение, в том числе и на выводах генератора. АРВ поднимают ток возбуждения, тем самым стремясь обеспечить номинальное напряжение на выводах. Вместе с тем существует предел, до которого можно поднимать ток возбуждения.

У ТГ $I_{*в пр} = 4$, а у ГГ $I_{*в пр} = 3$.

3.2. Аналитический расчет установившегося режима короткого замыкания

Возможны два случая рассмотрения данной стадии переходного процесса.

Генератор без АРВ

Когда в схеме присутствуют генераторы без АРВ, составляется эквивалентная схема замещения, в которой каждый из генераторов вводится величиной сопротивления x_d и ЭДС $E_{*\infty}$, определенными в зависимости от принятого спрямления ХХХ.

Если пользоваться спрямлением через точку с координатами (1,1), то $x_d = \frac{1}{K_C}$, $E_{*\infty} = I_{*в}$, если пользоваться спрямлением ХХХ

по касательной, то $x_d = \frac{C}{K_C}$; $E_{*\infty} = CI_{*в}$.

Величину x_d следует приводить к выбранным базисным условиям, то есть

$$x_{*d\delta} = x_d \frac{S_6}{S_{нг}}.$$

В тех случаях, когда для генератора неизвестно, с каким током возбуждения он работал до КЗ, величину ЭДС можно определить из выражения

$$E_{*\infty} = I_{*B} = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi + I_{*H} x_d)^2}, \quad (3.4)$$

которое получается из упрощенной векторной диаграммы синхронной машины (рис. 3.6), где I_{*H} , U_* , φ – ток, напряжение и угол сдвига между ними, с которыми работал генератор до КЗ. Если I_{*H} , U_* неизвестны, то считается в практических расчетах, что генератор до КЗ работал с номинальными параметрами и поэтому эти величины принимаются равными единице, то есть $I_{*H} = 1$, $U_* = 1$.

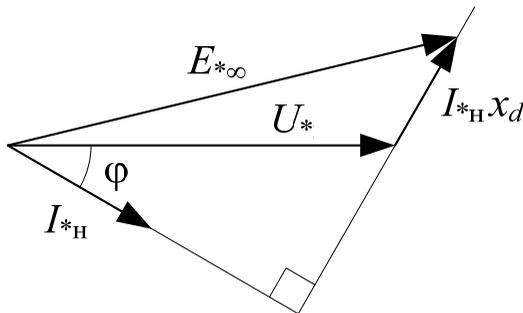


Рис. 3.6

Пассивные элементы в схеме замещения рассчитываются по известным выражениям, и далее, с помощью известных методов преобразования, схема приводится к виду (рис. 3.7).

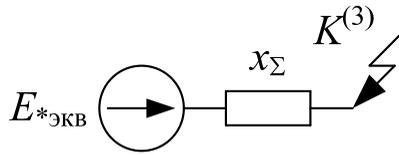


Рис. 3.7

Затем вычисляют ток КЗ в относительных единицах:

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_{\text{ЭКВ}}}{x_{\Sigma}}. \quad (3.5)$$

Ток в именованных единицах

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_{\text{б}}, \quad (3.6)$$

где $I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{ср н}}}$, кА;

$U_{\text{ср н}}$ – среднее номинальное напряжение той ступени, где находится точка КЗ.

Генераторы с АРВ

Снижение напряжения при КЗ приводит в действие АРВ генератора, который увеличивает ток возбуждения, соответственно напряжение на выводах генератора, а следовательно и ток КЗ. Степень увеличения тока возбуждения зависит от удаленности точки КЗ от генератора (по величине сопротивления), а так же характеристик генератора.

При удаленном КЗ напряжение на выводах генератора может быть восстановлено до номинального даже при незначительном подъеме (увеличении) тока возбуждения.

По мере приближения места КЗ к генератору требуется все большее значение тока возбуждения, чтобы поднять напряжение до номинального, однако рост тока возбуждения ограничен предельным значением $I_{*\text{в пр}}$.

В зависимости от величины внешнего сопротивления (удаленности точки КЗ от генератора) могут иметь место различные режимы, в которых может находиться генератор. Можно установить величину внешнего сопротивления при КЗ, за которым после работы АРВ напряжение на выводах генератора будет равным номинальному, а ток возбуждения будет равен предельному значению $I_{*в пр}$. Величину этого сопротивления называют *критической*, режим, в котором находится генератор при КЗ за этим сопротивлением, тоже *критическим*.

Таким образом для генератора с АРВ в зависимости от удаленности точки КЗ возможны следующие режимы, для которых характеризующие их соотношения будут:

1) критический режим

$$x_{*вн} = x_{*кр}, \quad I_{*в} = I_{*в пр}, \quad U_* = U_{*н};$$

2) режим предельного возбуждения (неудаленное КЗ).

В этом режиме АРВ поднял ток возбуждения до предельного значения, а напряжение на выводах осталось меньше номинального

$$x_{*вн} < x_{*кр}, \quad I_{*в} = I_{*в пр}, \quad U_* < U_{*н};$$

3) режим нормального напряжения (удаленное КЗ).

В этом случае имело место незначительное снижение напряжения на выводах генератора и было достаточно АРВ изменить (увеличить) ток возбуждения незначительно, как напряжение на выводах становилось равным номинальному:

$$x_{*вн} > x_{*кр}, \quad I_{*в} < I_{*в пр}, \quad U_* = U_{*н},$$

где $x_{*вн}$ – внешнее сопротивление – суммарное сопротивление всей схемы замещения от точки КЗ до выводов генератора.

Например, (рис. 3.8).

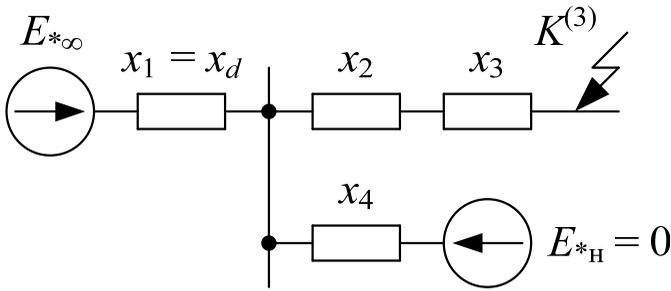


Рис. 3.8

$$x_{*ВН} = \frac{(x_2 + x_3)x_4}{x_2 + x_3 + x_4}.$$

Для выяснения величины $x_{*кр}$ рассмотрим следующую схему (рис. 3.9).

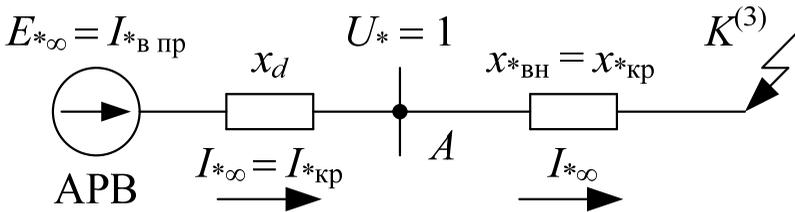


Рис. 3.9

$$E_{*\infty} = I_{*В пр}, \quad I_{*\infty} = I_{*кр}, \quad x_{*ВН} = x_{*кр}.$$

Для точки A запишем

$$U_* = I_{*\infty} x_{*кр}, \quad (3.7)$$

$$U_* = E_{*\infty} - I_{*\infty} x_d. \quad (3.8)$$

Выразив $I_{*\infty}$ из (3.7) и подставив в (3.8), получим

$$U_* = E_{*\infty} - \frac{U_* x_d}{x_{*кр}}, \quad U_* x_d = (E_{*\infty} - U_*) x_{*кр}. \quad (3.9)$$

$$x_{*кр} = \frac{U_*}{E_{*\infty} - U_*} x_d = \frac{U_*}{I_{*в пр} - U_*} x_d. \quad (3.10)$$

Если принять, что до КЗ генератор работал с номинальным напряжением, то

$$x_{*кр} = \frac{1}{I_{*в пр} - 1} x_d. \quad (3.11)$$

Рассмотрим, какие значения приобретает $x_{*кр}$ для типового турбо- и гидрогенератора:

$$\text{ТГ: } I_{*в пр} = 4, \quad x_d = \frac{1}{K_C} = \frac{1}{0,7};$$

$$x_{*кр} = \frac{1}{0,7} \frac{1}{4-1} \approx 0,5.$$

$$\text{ГГ: } I_{*в пр} = 3, \quad x_d = \frac{1}{K_C} = \frac{1}{1,1};$$

$$x_{*кр} = \frac{1}{1,1} \frac{1}{3-1} \approx 0,5.$$

Таким образом, величина $x_{*кр} = 0,5$ получается как для ТГ, так и ГГ, при номинальных данных генератора. Величина $x_{*вн}$ в процессе составления схемы замещения и преобразования ее будет получаться при выбранных базисных условиях, которые будут отличаться от номинальных данных генератора. В связи с этим, прежде чем сравнивать эти величины, необходимо привести их к одним и тем же базисным условиям:

$$x_{*крб} = x_{*кр} \frac{S_6}{S_{нг}}. \quad (3.12)$$

Далее сравнивают $x_{*вн}$ и $x_{*крб}$.

Если в процессе сравнения $x_{*вн}$ и $x_{*крб}$ выясняется, что имеет место режим нормального напряжения, то есть $x_{*вн} > x_{*крб}$, то в этом случае на выводах генератора поддерживается номинальное напряжение и $U_* = 1$, а ток КЗ

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{U_*}{x_{*вн}}, \quad I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} I_6, \text{ кА.}$$

Если $x_{*вн} < x_{*крб}$, то это говорит о том, что генератор при КЗ за этим сопротивлением находится в режиме предельного возбуждения. Его следует ввести в схему замещения ЭДС $E_{*пр} = I_{*в пр}$ и сопротивлением установившегося режима

$$x_1 = x_d \frac{S_6}{S_n} = \frac{1}{K_C} \frac{S_6}{S_n}.$$

Тогда ток КЗ будет определяться

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{I_{*в пр}}{x_1 + x_{*вн}};$$

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} I_6, \text{ кА.}$$

Для рассмотренных режимов генератора можно представить условные эпюры напряжений (рис. 3.10).

При КЗ в точке K_1 $x_{*вн} < x_{*кр}$ – режим предельного возбуждения (РПВ).

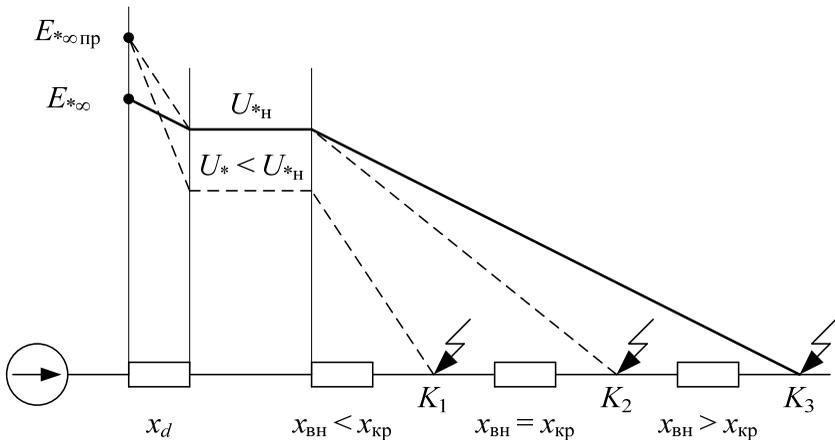


Рис. 3.10

При КЗ в точке K_2 $x_{вн} = x_{кр}$ – критический режим.

При КЗ в точке K_3 $x_{вн} > x_{кр}$ – режим нормального напряжения (РНН).

3.3. Расчет установившегося режима трехфазного короткого замыкания в сложных схемах

В тех случаях, когда в сложных схемах присутствуют все генераторы без АРВ, расчет установившегося режима КЗ не вызывает никаких сложностей. Генераторы в схему замещения вводятся установившимися ЭДС и сопротивлениями, которые определяются через известные $I_{*в}$ и K_C генераторов.

Когда же в сложной схеме присутствуют генераторы с АРВ, понятие внешней реактивности для каждого генератора теряет смысл. В этом случае для выяснения режима каждого из генераторов применяют метод последовательных приближений.

Для этого каждому генератору схемы, в зависимости от удаленности от точки КЗ, произвольно присваивается либо режим предельного возбуждения (генератор в схему замещения вводится ЭДС $E_{*∞пр} = I_{*в пр}$ и x_d), либо режим нормального напряжения (генератор в схему замещения вводится ЭДС $E_{*∞} = U_{*ном} = 1$, $x_d = 0$) (рис. 3.12).

После этого осуществляется расчет тока КЗ в точке K и распределение его по отдельным ветвям. Зная вычисленные действительные токи генераторов, сравнивают их с критическими токами. Для режима предельного возбуждения:

$$I_{\Gamma} > I_{\text{кр}}$$

Для режима нормального напряжения:

$$I_{\Gamma} < I_{\text{кр}}$$

где

$$I_{\text{кр}} = \frac{U_*}{x_{*\text{крб}}} I_{\text{б}} = \frac{1}{x_{*\text{крб}}} I_{\text{б}} \quad \text{или} \quad I_{\text{кр}} = \frac{U_*}{x_{*\text{кр}}} I_{\text{нг}} = \frac{1}{0,5} I_{\text{нг}} = 2I_{\text{нг}}, \text{ кА.}$$

То есть критический ток в два раза превышает номинальный ток генератора. Если в результате проверки оказалось, что режимы некоторых генераторов выбраны изначально неверно, то их следует изменить на противоположные и произвести новый расчет с последующей проверкой. Так поступают до тех пор, пока выбранный и расчетный режимы не совпадут.

При расчете сложных схем в первую очередь следует установить возможный режим работы ближайшего к месту КЗ генератора. Если получается, что для него должен быть принят режим предельного возбуждения (РПВ), то следует перейти к оценке возможных режимов других генераторов, рассматривая их поочередно в порядке увеличения их удаленности. Как только выявляется генератор (или станция), находящийся в режиме нормального напряжения, все подключенные к нему элементы, которые не образуют путей для тока к месту КЗ, могут быть отброшены.

Рассмотрим пример (рис. 3.11).

Составим эквивалентную схему замещения (рис. 3.12). Сравнив внешнее сопротивление с критическим, положим, получаем, что Г1 находится в режиме предельного возбуждения, а Г2 и Г3 в режиме нормального напряжения.

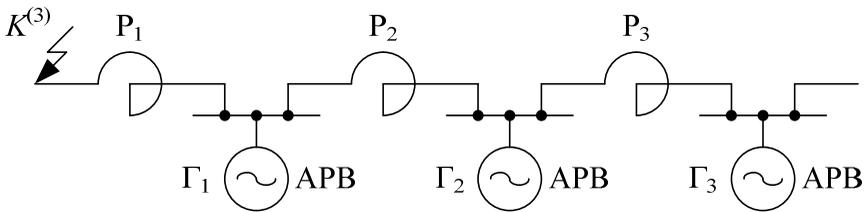


Рис. 3.11

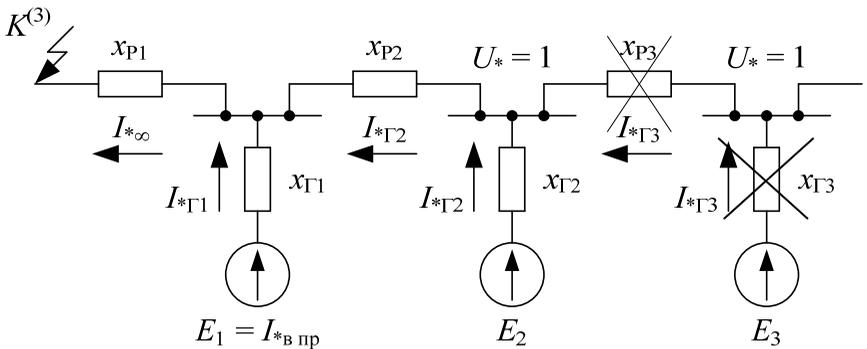


Рис. 3.12

Для $\Gamma 1$ $x_{p1} < x_{*кр}$.

Для $\Gamma 2$ $(x_{p1} + x_{p2}) > x_{*кр}$.

Для $\Gamma 3$ $(x_{p1} + x_{p2} + x_{p3}) > x_{*кр}$.

С учетом выбранных режимов выполним расчет $I_{*\infty}^{(3)}$, а также $I_{*\Gamma 1}$ и $I_{*\Gamma 2}$.

Затем определяем

$$I_{\Gamma 1} = I_{*\Gamma 1} I_{\delta}, \text{ кА} \quad \text{и} \quad I_{\Gamma 2} = I_{*\Gamma 2} I_{\delta}, \text{ кА}.$$

Сравниваем их с критическим током

$$I_{кр} = \frac{1}{x_{*крб}} I_{\delta}, \text{ кА}.$$

Если $I_{Г2} > I_{кр}$, это означает, что генератор Г2 работает в режиме предельного возбуждения.

В этом случае необходимо перезапустить режим Г2 и повторить расчет (рис. 3.13).

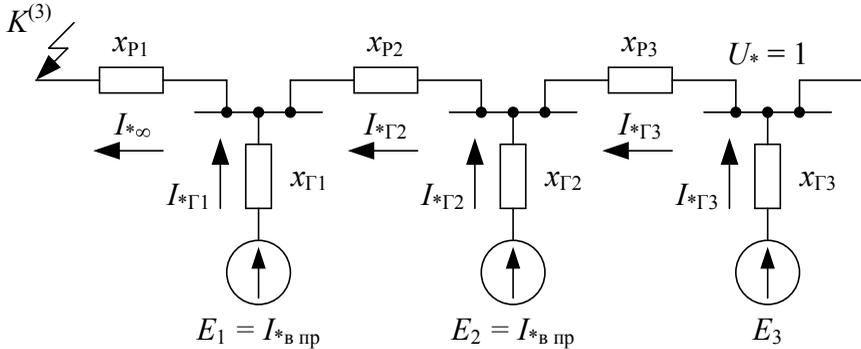


Рис. 3.13

Расчет повторяют до тех пор, пока выбранный и расчетный режимы не совпадут.

3.4. Влияние и учет нагрузки в установившемся режиме короткого замыкания

В установившемся режиме КЗ влияние нагрузки проявляется в том, что предварительно нагруженный генератор имеет больший ток возбуждения, чем генератор, работающий на ХХ, а также в том, что, оставаясь присоединенной к сети, она влияет на величину тока КЗ в аварийной ветви и в ветви генератора.

Она, как правило, шунтирует аварийную ветвь, тем самым уменьшая в ней ток, и увеличивает ток генератора. Чтобы уяснить это, рассмотрим простейшую схему (рис. 3.14).

1. При отсутствии нагрузки

$$I_{*КЗ} = I_{*Г} = \frac{E_{*∞}}{x_{*∞} + x_{*К}}. \quad (3.13)$$

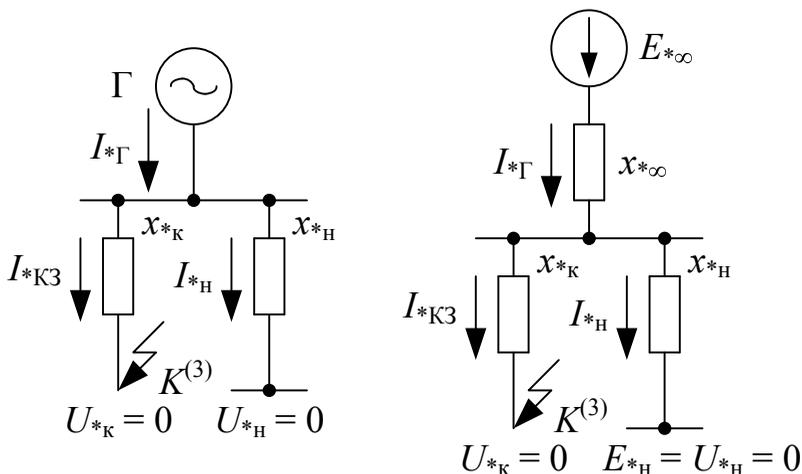


Рис. 3.14

2. При наличии нагрузки

$$I_{*КЗ} = I_{*\Gamma} \frac{x_{*Н}}{x_{*К} + x_{*Н}}; \quad (3.14)$$

$$I_{*\Gamma} = \frac{E_{*\infty}}{x_{*\infty} + \frac{x_{*К}x_{*Н}}{x_{*К} + x_{*Н}}}. \quad (3.15)$$

Сопротивление нагрузки, основу которой составляют асинхронные двигатели (АД), определяется скольжением S двигателей, которое изменяется в процессе переходного режима, так как оно является функцией напряжения в точке присоединения нагрузки, а оно, в свою очередь, является функцией искомого тока КЗ.

Поэтому для упрощения практических расчетов нагрузку учитывают приближенно, характеризуя ее некоторой постоянной реактивностью. Для установления значения этого сопротивления рассмотрим следующую схему (рис. 3.15).

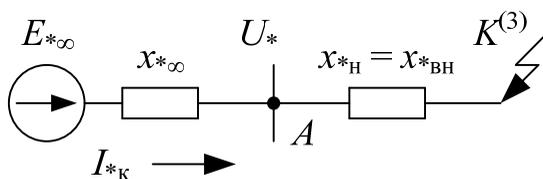


Рис. 3.15

$$x_{*Н} = x_{*ВН};$$

$$x_{*Н} = f(S, U, I);$$

$$U_* = E_{*\infty} - I_{*К} x_{*\infty};$$

$$U_* = I_{*К} x_{*Н};$$

$$I_{*К} = \frac{U_*}{x_{*Н}};$$

$$U_* = E_{*\infty} - \frac{U_* x_{*\infty}}{x_{*Н}}; \quad x_{*Н} = \frac{U_* x_{*\infty}}{E_{*\infty} - U_*} = \frac{x_{*\infty}}{E_{*\infty} - 1}. \quad (3.16)$$

Учитывая то, что ТГ, работающий с номинальной нагрузкой, имеет $I_{*В} = 2,3$, а $x_d = \frac{1}{K_C} = \frac{1}{0,7}$, получим $x_{*Н} = \frac{1}{0,7} \frac{1}{2,3-1} \approx 1,1$.

В практических расчетах принимают $x_{*Н} = 1,1-1,3$ или $x_{*Н} = 1,2$.

Величина $x_{*Н}$ отнесена к полной номинальной мощности нагрузки и среднономинальному напряжению той ступени, к которой она подключена. Поэтому при составлении схем замещения величину этого сопротивления необходимо приводить к базисным условиям:

$$x_{*Нб} = x_{*Н} \frac{S_{б}}{S_{НН}} = 1,2 \frac{S_{б}}{S_{НН}}.$$

ЭДС нагрузки в установившемся режиме принимается равной нулю. Так как напряжение в точке КЗ равно нулю и ЭДС нагрузки равна нулю, то нагрузка, подключенная к точке КЗ, в установив-

шемся режиме никак не влияет на величину токов и поэтому в расчетах не учитывается.

3.5. Определение остаточного напряжения в установившемся режиме короткого замыкания

Остаточное напряжение в той или иной точке схемы в установившемся режиме КЗ определяется как падение напряжения от протекания установившегося тока КЗ по сопротивлению от точки КЗ до точки, в которой определяется эта величина (рис. 3.16).

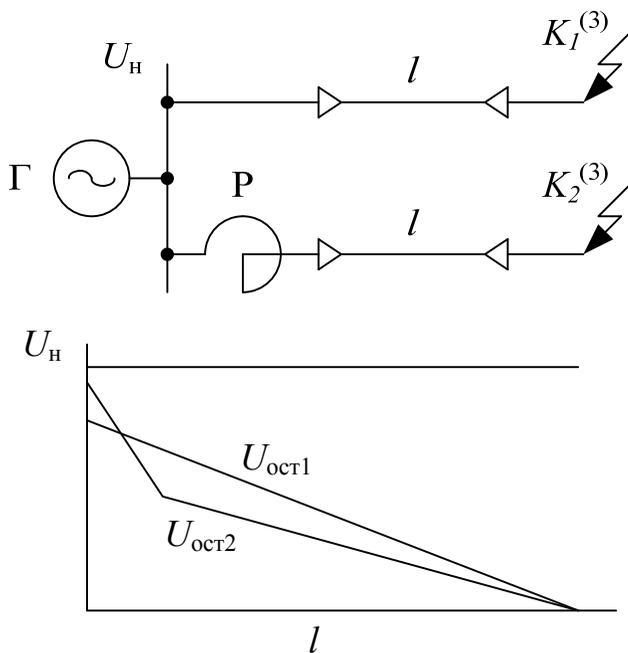


Рис. 3.16

$$U_{*ост1} = I_{*КЗ1} X_{л}; \quad (3.17)$$

$$U_{*ост2} = I_{*КЗ2} (X_{л} + X_{р}). \quad (3.18)$$

На электрических станциях в схемах питания собственных нужд величина $U_{\text{ост}}$ на шинах должна быть не менее $0,6U_{\text{н}}$ для того, чтобы был успешным самозапуск двигателей после восстановления нормального режима.

С целью повышения уровня остаточного напряжения и снижения уровня токов КЗ на кабельных линиях устанавливают реакторы.

3.6. Внезапное трехфазное короткое замыкание в простейшей электрической цепи

Простейшей трехфазной цепью называется цепь, которая не содержит магнитосвязанных элементов и которая питается от источника синусоидального напряжения, амплитуда которого не изменяется во времени (рис. 3.17).

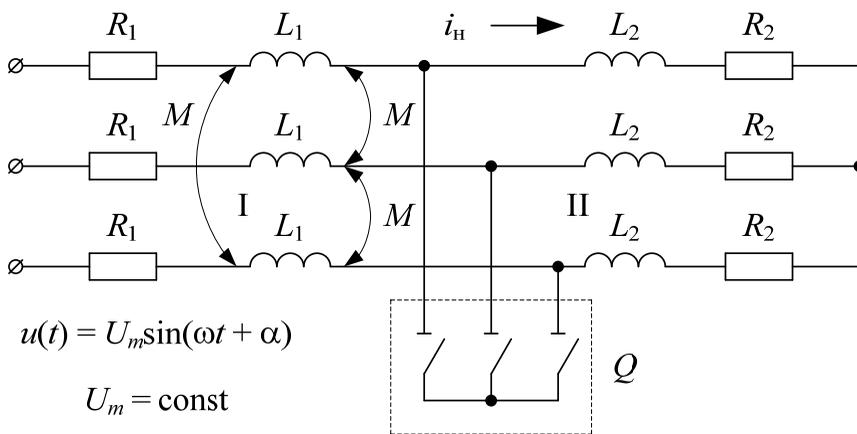


Рис. 3.17

До короткого замыкания в схеме протекал ток нагрузки i_n :

$$i_n = I_{mн} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_n), \quad (3.19)$$

где

$$I_{mH} = \frac{U_m}{Z_H}, \quad \operatorname{tg}\varphi_H = \frac{x_H}{R_H}, \quad x_H = \omega(L_1 + L_2), \quad R_H = R_1 + R_2; \quad (3.20)$$

α – начальная фаза включения источника;

φ_H – угол сдвига между напряжением и током.

При включении выключателя Q (см. рис. 3.17) происходит внезапное КЗ и схема распадается на два независимых участка I и II, один из которых остается присоединенным к источнику питания, а второй превращается в короткозамкнутый контур.

На втором (короткозамкнутом) участке ток будет поддерживаться до тех пор, пока запасенная энергия магнитного потока в L_2 не перейдет в тепло, поглощаемое активным сопротивлением этого участка R_2 .

Для этого участка баланс напряжений в каждой фазе запишется уравнением:

$$0 = iR_2 + L_2 \frac{di}{dt}. \quad (3.21)$$

Его решение имеет следующий вид:

$$i(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3.22)$$

где

$$\tau = \frac{L_2}{R_2} = \frac{X_2}{\omega R_2}; \quad (3.23)$$

τ – постоянная времени затухания свободной составляющей тока.

Графическая интерпретация решения уравнения (3.21) представлена на рис. 3.18.

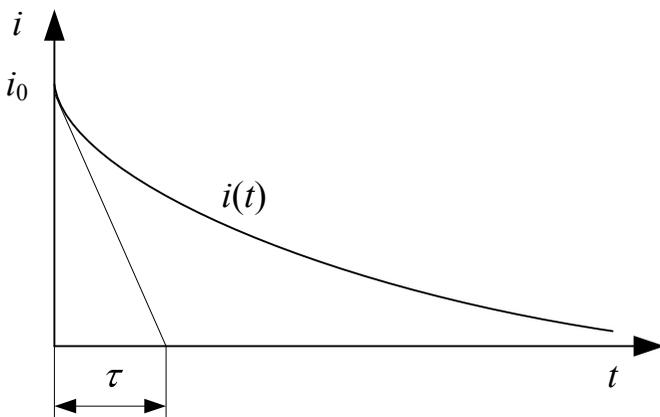


Рис. 3.18

Для определения начального значения тока i_0 рассмотрим момент КЗ:

$$t = 0, i(0) = i_0, i_0 = i(0) = i_H(0) = I_{mH} \sin(\alpha - \varphi_H). \quad (3.24)$$

Тогда окончательное решение уравнения (3.21):

$$i(t) = [I_{mH} \sin(\alpha - \varphi_H)] e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.25)$$

Свободные токи на втором участке во всех фазах затухают с одной и той же постоянной времени τ , однако начальные значения токов в каждой из фаз различны за счет фазового сдвига. Начальное значение тока на втором участке i_0 никогда не может превышать амплитуду тока предшествующего режима, то есть I_{mH} (рис. 3.19).

Рассмотрим протекание переходного процесса на участке I .

Дифференциальное уравнение равновесия для любой фазы, например, фазы A на первом участке, запишется как:

$$U_A(t) = i_A R_1 + L_1 \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt}, \quad (3.26)$$

где L_1 – собственная индуктивность фаз цепи КЗ (участок I);
 M – взаимная индуктивность фаз цепи КЗ.

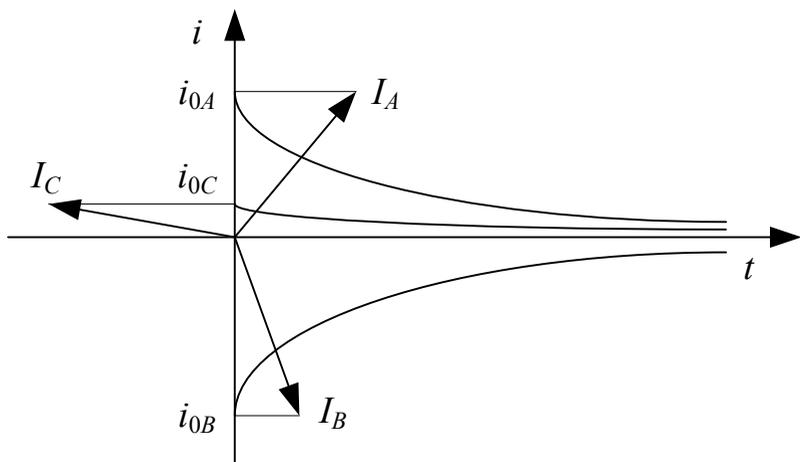


Рис. 3.19

Аналогично можно записать уравнение баланса напряжений для двух других фаз.

Учитывая, что

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad \text{или} \quad i_A = -(i_B + i_C).$$

Уравнение (3.26) представим как

$$U_A(t) = i_A R_1 + L_1 \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_A}{dt}. \quad (3.27)$$

Для любой из фаз уравнение равновесия запишется

$$U(t) = i R_k + L_k \frac{di}{dt}, \quad (3.28)$$

где $R_k = R_1$, $L_k = L_1 - M$ соответственно активное сопротивление и индуктивность короткозамкнутой цепи. Решение данного уравнения имеет вид:

$$i(t) = i_{\text{п}}(t) + i_{\text{св}}(t), \quad (3.29)$$

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

$i_{\text{св}}(t)$ – свободная (апериодическая) составляющая тока КЗ,

$$i_{\text{св}}(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau_k}}, \quad (3.30)$$

где

$$\tau_k = \frac{L_k}{R_k} = \frac{X_k}{\omega R_k}, \quad (3.31)$$

$$i_{\text{п}}(t) = I_{\text{мп}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k), \quad (3.32)$$

где

$$I_{\text{мп}} = \frac{U_m}{Z_k}, \quad Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}, \quad \text{tg} \varphi_k = \frac{X_k}{R_k}, \quad (3.33)$$

$$i(t) = I_{\text{мп}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_0 e^{-\frac{t}{\tau_k}}. \quad (3.34)$$

Для выяснения начального значения свободного тока i_0 рассмотрим момент коммутации $t = 0$.

В начальный момент сумма периодической и свободной составляющей тока равна току, который был в фазе в момент возникновения КЗ, то есть току нагрузки (току предшествующего режима):

$$i(0) = i_{\Pi}(0) + i_{\text{CB}}(0);$$

$$i_{\text{CB}}(0) = i(0) - i_{\Pi}(0);$$

$$i(0) = i_{\text{H}}(0) = I_{\text{mH}} \sin(\alpha - \varphi_{\text{H}}); \quad (3.35)$$

$$i_{\Pi}(0) = I_{\text{m}\Pi} \sin(\alpha - \varphi_{\text{K}}), \quad i_{\text{CB}}(0) = i_0;$$

$$i_0 = I_{\text{mH}} \sin(\alpha - \varphi_{\text{H}}) - I_{\text{m}\Pi} \sin(\alpha - \varphi_{\text{K}}).$$

Иследуем данное выражение на максимум, то есть выясним, при каких условиях свободная составляющая тока КЗ будет максимальной. В соответствии с критериями Лагранжа функция имеет максимум, если частные производные по переменным равны нулю, то есть:

$$\frac{\partial i_0}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial i_0}{\partial \varphi_{\text{H}}} = 0, \quad \frac{\partial i_0}{\partial \varphi_{\text{K}}} = 0; \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial i_0}{\partial \alpha} = I_{\text{mH}} \cos(\alpha - \varphi_{\text{H}}) - I_{\text{m}\Pi} \cos(\alpha - \varphi_{\text{K}}) = 0; \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial i_0}{\partial \varphi_{\text{H}}} = -I_{\text{mH}} \cos(\alpha - \varphi_{\text{H}}) = 0; \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial i_0}{\partial \varphi_{\text{K}}} = I_{\text{m}\Pi} \cos(\alpha - \varphi_{\text{K}}) = 0. \quad (3.39)$$

Это возможно, когда

$$\alpha - \varphi_{\text{K}} = \frac{\pi}{2}; \quad (3.40)$$

$$\alpha - \varphi_{\text{H}} = -\frac{\pi}{2}; \quad (3.41)$$

$$\alpha - \varphi_{\text{K}} - \alpha + \varphi_{\text{H}} = \pi, \quad \varphi_{\text{H}} - \varphi_{\text{K}} = \pi. \quad (3.42)$$

Максимум i_0 будет иметь место, если ток предшествующего режима i_H и периодическая составляющая тока последующего режима i_{Π} будут находиться в противофазе (рис. 3.20).

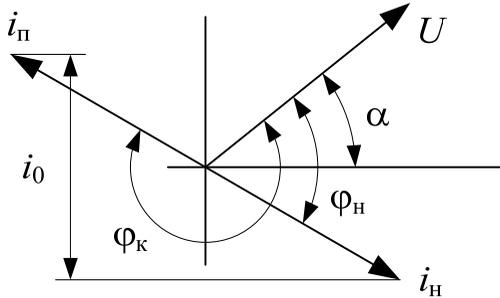


Рис. 3.20

Из представленной диаграммы видно, что вторым условием существования максимального значения i_0 является условие $\alpha = 0$. Такое условие в трехфазной системе может быть лишь в одной из фаз.

В реальных условиях $(\varphi_H - \varphi_{\kappa})$ всегда меньше 90° (рис. 3.21).

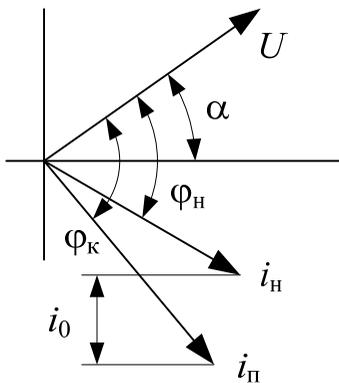


Рис. 3.21

В реальных схемах $i_0 = \max$, когда $\alpha = 0$, а также, когда в момент КЗ ток предшествующего режима (i_H) проходит через нуль, т. е. $i_H(0) = 0$:

$$\begin{aligned}
 i_0 &= i_H(0) - i_{\Pi}(0) = -i_{\Pi}(0) = \\
 &= -I_{m\Pi} \sin(\alpha - \varphi_K) = -I_{m\Pi} \sin(90^\circ) = -I_{m\Pi}.
 \end{aligned}
 \tag{3.43}$$

Тогда полный ток в цепи КЗ

$$i(t) = I_{m\Pi} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - I_{m\Pi} e^{-\frac{t}{\tau_K}}.
 \tag{3.44}$$

Изменение полного тока и его составляющих показано на рис. 3.22.

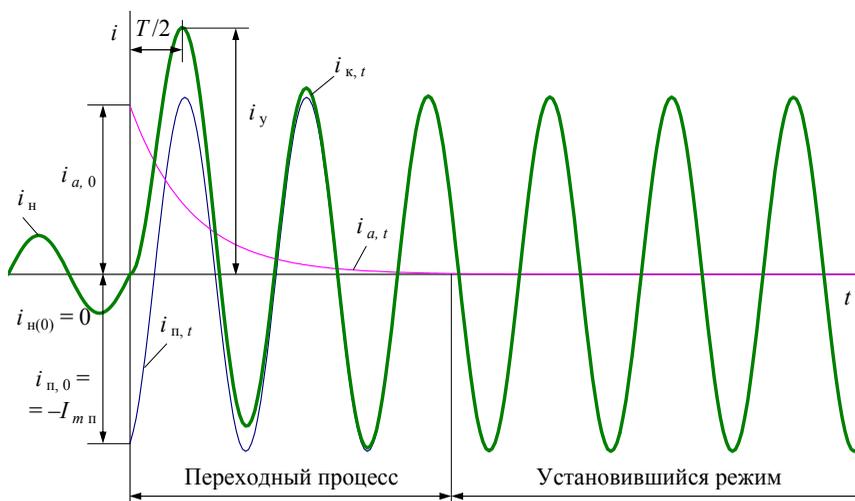


Рис. 3.22

3.7. Ударный ток короткого замыкания

Полный ток КЗ достигает наибольшего значения при наибольших значениях его составляющих.

Полный ток несимметричен относительно оси времени. Наличие аperiodической (свободной) составляющей тока искажает форму полного тока КЗ и делает ее несимметричной относительно оси времени. Кривую изменения аperiodической составляющей тока можно рассматривать как криволинейную ось симметрии кривой полного тока.

Максимальное мгновенное значение полного тока называется *ударным током КЗ*. Он наступает приблизительно через полпериода, что при частоте $f = 50$ Гц составляет $t = 0,01$ с, с момента КЗ.

$$i_y = I_{мп} + I_{мп} e^{-\frac{0,01}{\tau_k}} = I_{мп} \left(1 + e^{-\frac{0,01}{\tau_k}} \right) = k_y I_{мп} = \sqrt{2} k_y I_{п}, \quad (3.45)$$

где $k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{\tau_k}}$ – ударный коэффициент, показывающий превышение ударного тока над амплитудой периодической составляющей тока КЗ.

Поскольку $\tau_k = 0$ при $L_k = 0$ (цепь чисто активная), то $k_y = 1$ и $\tau_k = \infty$ при $R_k = 0$ (цепь чисто индуктивная). Тогда $k_y = 2$, то есть $1 \leq k_y \leq 2$.

Обычно в практических расчетах принимают $k_y = 1,8$ при расчете тока КЗ в высоковольтных сетях и $k_y = 1$ при КЗ в сетях до 1000 В. Чем меньше τ_k , тем меньше k_y , тем быстрее затухает свободный ток;

$I_{п}$ – действующее значение периодической составляющей начального (сверхпереходного) тока КЗ.

3.8. Действующее значение тока короткого замыкания и его составляющих

Действующее значение полного тока КЗ в произвольный момент времени определяется как среднеквадратичное значение тока за период T , в середине которого находится рассматриваемый момент времени.

В связи с этим, если известна зависимость $i = f(t)$, то его действующее значение в любой момент времени можно определить как

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i^2 dt}. \quad (3.46)$$

Однако зависимость $i = f(t)$ в общем случае сложна, поэтому для упрощения расчета действующего значения тока принимают, что за рассматриваемый период обе слагающие тока, периодическая и аperiodическая, остаются неизменными и каждая из них равна своему значению в данный момент времени t .

$$I_{\pi} = \frac{I_{m\pi}}{\sqrt{2}}, \quad (3.47)$$

$$I_{дсв} = I_{m\pi} e^{-\frac{0,01}{\tau_k}} = I_{m\pi} (k_y - 1), \quad (3.48)$$

где I_{π} – действующее значение периодической составляющей тока КЗ;

$I_{дсв}$ – действующее значение свободной составляющей тока КЗ.

Тогда действующее значение ударного тока

$$\begin{aligned} I_y &= \sqrt{I_{\pi}^2 + I_{дсв}^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{m\pi}}{\sqrt{2}}\right)^2 + I_{m\pi}^2 (k_y - 1)^2} = \\ &= I_{m\pi} \sqrt{\frac{1}{2} + (k_y - 1)^2} = \frac{I_{m\pi}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2} = I_{\pi} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Согласно указанным ранее пределам изменения k_y , величина отношения действующего значения ударного тока и действующего значения периодической составляющей тока КЗ $\frac{I_y}{I_{\pi}}$ находится

в пределах $1 < \frac{I_y}{I_{\pi}} < \sqrt{3}$.

3.9. Внезапное трехфазное короткое замыкание в цепи с трансформаторами (неподвижная магнитосвязанная цепь)

Если принять в качестве допущения отсутствие насыщения в стали магнитопровода трансформатора, исследование его режима при возникновении КЗ значительно упрощается, так как между токами и напряжениями сохраняется линейная зависимость и они между собой связаны линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. При рассмотрении КЗ за трансформатором будем также пренебрегать током намагничивания $i_{\mu} = 0$ ввиду того, что обе обмотки трансформатора находятся на одном стержне, то есть $z_{\mu} \rightarrow \infty$.

Допустим, что на выводах вторичной обмотки трансформатора, к первичной обмотке которого подключен источник неограниченной мощности с напряжением $U(t)$, произошло трехфазное КЗ (рис. 3.23).

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha), U_m = \text{const.} \quad (3.50)$$

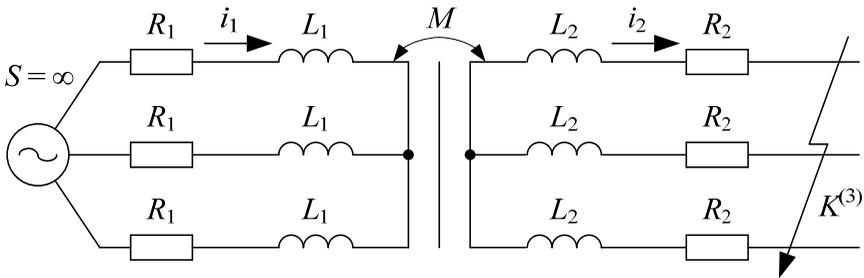


Рис. 3.23

Считая параметры вторичной обмотки приведенными к первичной и учитывая принятые допущения в соответствии с рис. 3.24 и выражением (3.51), можно записать следующие дифференциальные уравнения баланса напряжений первичной и вторичной обмоток:

$$U(t) = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \quad (3.52)$$

$$0 = \overset{\circ}{i}_2 \overset{\circ}{R}_2 + \overset{\circ}{L}_2 \frac{d\overset{\circ}{i}_2}{dt} + M \frac{d\overset{\circ}{i}_1}{dt}. \quad (3.53)$$

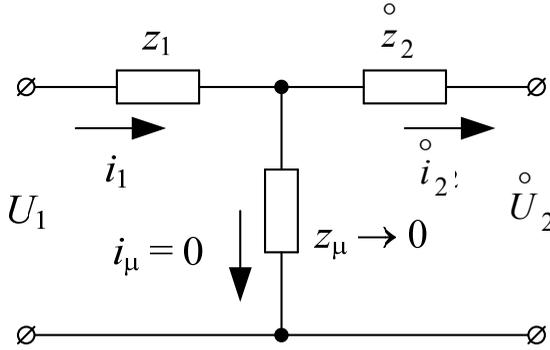


Рис. 3.24

$$\overset{\circ}{i}_1 = \overset{\circ}{i}_2 = i. \quad (3.51)$$

Символ « $\overset{\circ}$ » означает, что параметры приведены к первичной стороне.

M – взаимоиндуктивность между обмотками.

Сложив уравнение (3.52) и (3.53) с учетом (3.51), получим

$$U(t) = iR_k + L_k \frac{di}{dt}, \quad (3.54)$$

где $R_k = R_1 + R_2$ – активное сопротивление трансформатора;

$L_k = L_1 + L_2 + 2M$ – индуктивность трансформатора.

Уравнение (3.54) аналогично уравнению, описывающему переходный процесс в простейшей трехфазной цепи. Следовательно, при рассматриваемых условиях свободная составляющая тока в обеих обмотках трансформатора затухает с одной и той же постоянной времени $\tau_k = \frac{L_k}{R_k}$. Полный ток КЗ состоит из тех же состав-

ляющих, и характер изменения его во времени имеет тот же вид, что и при переходном процессе в простейшей цепи.

Таким образом, при исследовании процесса КЗ в схемах, содержащих трансформаторы (неподвижные магнитосвязанные цепи), трансформатор практически можно рассматривать как обычный элемент схемы со своими R и L цепи, после приведения параметров к одной ступени напряжения.

3.10. Переходный процесс при включении трансформатора на холостой ход

Рассмотрим переходный процесс, возникающий при включении трансформатора на синусоидальное напряжение постоянной амплитуды и частоты (рис. 3.25).

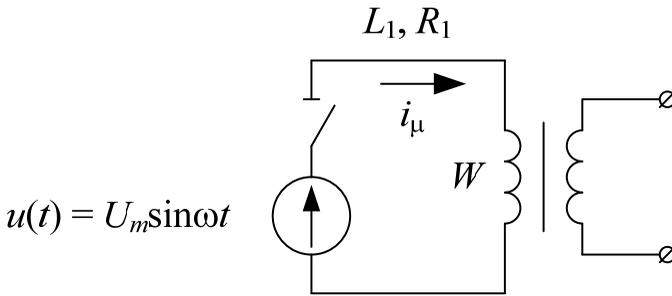


Рис. 3.25

Уравнение баланса напряжений:

$$U(t) = i_{\mu} R_1 + L_1 \left(i_{\mu} \right) \frac{di_{\mu}}{dt}, \quad (3.55)$$

где i_{μ} – ток намагничивания трансформатора.

Уравнение (3.55) нелинейно, так как присутствует $L_1 = f(i_{\mu})$.

Для упрощения решения данного уравнения рассмотрим включение трансформатора без потерь ($R_1 = 0$) на ХХ при условии, что

$\alpha = 0$, то есть подведенное напряжение проходит через 0. В этом случае условие равновесия напряжений после включения может быть описано следующим дифференциальным уравнением

$$U(t) = W \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.56)$$

или

$$U_m \sin \omega t = W \frac{d\Phi}{dt}; \quad (3.57)$$

$$U_m \sin \omega t dt = W d\Phi. \quad (3.58)$$

Проинтегрируем левую и правую части уравнения (3.58) и получим

$$\frac{-U_m \cos \omega t}{\omega} = W\Phi(t) + C, \quad (3.59)$$

где C – постоянная интегрирования.

Для ее определения рассмотрим момент коммутации $t = 0$. Тогда

$$\Phi(0) = 0, \quad C = \frac{-U_m}{\omega}. \quad (3.60)$$

Подставив (3.60) в (3.59) и разрешив относительно $\Phi(t)$, получим

$$\Phi(t) = \frac{U_m}{\omega W} - \frac{U_m}{\omega W} \cos \omega t \quad (3.61)$$

или

$$\Phi(t) = \frac{U_m}{\omega W} (1 - \cos \omega t) = \Phi_m (1 - \cos \omega t). \quad (3.62)$$

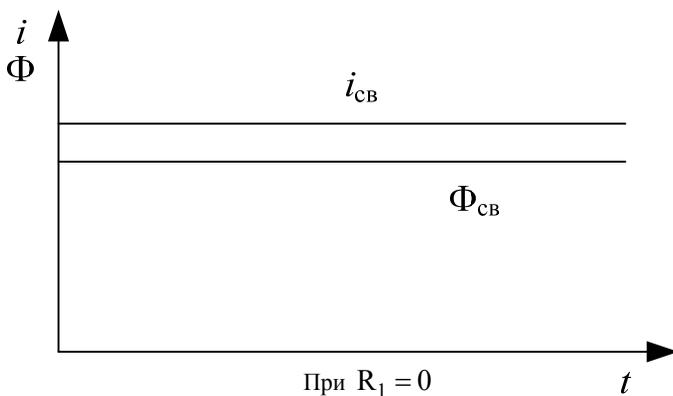


Рис. 3.26

Для реального трансформатора с учетом потерь ($R_1 \neq 0$) постоянная составляющая магнитного потока в (3.62) будет затухать с постоянной времени (рис. 3.27).

$$\tau = \frac{L_1}{R_1}, \text{ то есть} \quad (3.63)$$

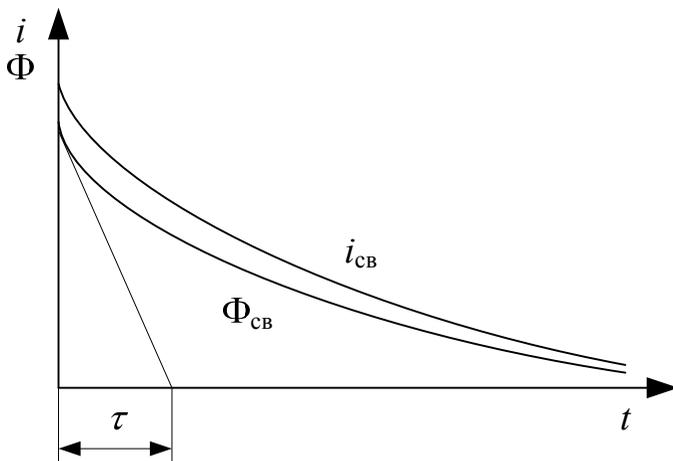


Рис. 3.27

Связь между потоком Φ и током намагничивания i_{μ} выражается кривой намагничивания стали сердечника трансформатора $\Phi = f(i_{\mu})$. Зная кривую намагничивания и закон изменения магнитного потока во времени $\Phi(t)$, можно графическим путем получить зависимость $i_{\mu} = f(t)$ в переходном процессе включения трансформатора (рис. 3.28).

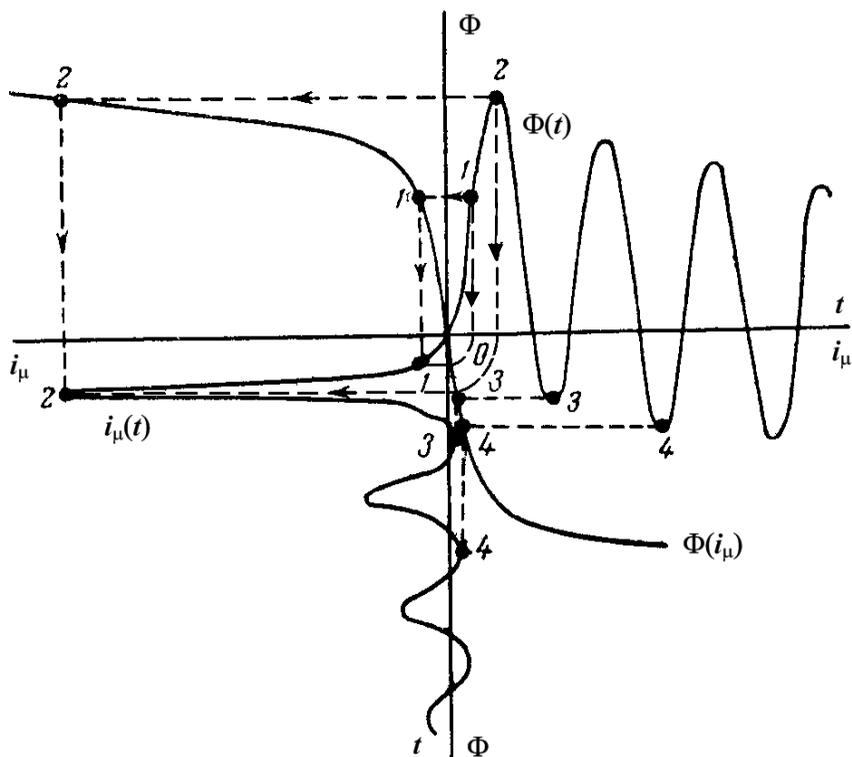


Рис. 3.28

Как видно из рисунка, при включении трансформатора на ХХ через первые полпериода (0,01 с) возникает ударный магнитный поток, который может превышать периодическую составляющую магнитного потока в два и более раз. Для создания такого потока

в момент включения возникает бросок тока намагничивания, величина которого соизмерима с током КЗ при КЗ за трансформатором, то есть этот ток может превышать в 8–12 раз номинальный ток трансформатора. В силу своей кратковременности он не вызывает опасных температурных явлений в трансформаторе. Однако его величины достаточно для срабатывания устройств релейной защиты, и если не предусмотреть никаких устройств, то они будут отключать этот режим, не отличив его от режима КЗ. Если разложить функцию $i_{\mu}(t)$ в ряд Фурье, можно увидеть, что вторая гармоническая составляющая составляет около 60 %, в то время как в токе КЗ ее присутствие составляет менее 30 %. Для блокировки работы защит при броске тока намагничивания также можно использовать наличие большой апериодической составляющей в нем. Это различие и учитывают в принципах построения устройств релейной защиты. В действительности же трансформатор обладает остаточным магнетизмом, и это обстоятельство приводит еще к большим броскам тока намагничивания при включении ненагруженного трансформатора.

4. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ВНЕЗАПНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ В ПОДВИЖНЫХ МАГНИТОСВЯЗАННЫХ ЦЕПЯХ

Когда известен переменный магнитный поток, то известна и ЭДС, наводимая этим потоком в данной обмотке. В тех случаях, когда рассматриваемый магнитный поток является функцией искомого тока, обусловленная им ЭДС обычно учитывается как равная и противоположная по знаку величина падения напряжения от протекания этого тока по соответствующему данному магнитному потоку индуктивному сопротивлению машины.

Во всех последующих выкладках будем пользоваться следующими допущениями:

- ЭДС синхронной машины изменяется во времени по мере затухания свободных токов в контурах;
- поскольку имеется воздушный зазор между ротором и статором, то цепь обладает рассеиванием.

4.1. ЭДС и сопротивление синхронной машины в начальный момент переходного процесса

Установим, какими ЭДС и реактивностями можно характеризовать СМ в начальный момент переходного процесса. Для выявления этих величин рассмотрим картину магнитных потоков в СМ.

а) СМ без успокоительных обмоток ($У_0$) (рис. 4.1).

Поток ротора $\dot{\Phi}_в$ расходуется на поток рассеяния $\dot{\Phi}_{в\delta}$, поток реакции статора на ротор $\dot{\Phi}_{ad}$ и на поток в воздушном зазоре $\dot{\Phi}_\delta$.

$\dot{\Phi}_d$ – поток, полезносцепленный с обмоткой статора, он и вызывает ответную реакцию статора на ротор.

$\dot{\Phi}_{в\delta}$ – результирующий поток, полезносцепленный с обмоткой ротора (возбуждения).

В момент нарушения режима (КЗ) увеличивается реакция статора на ротор на величину $\Delta\dot{\Phi}_{ad}$ (так как увеличился ток статора). В ответ на эту реакцию увеличивается ток возбуждения и, следовательно, увеличивается поток обмотки возбуждения на величину

$\Delta\dot{\Phi}_B = \Delta\dot{\Phi}_{ad}$. С увеличением потока возбуждения, так как цепь обладает рассеянием, увеличивается поток рассеяния обмотки возбуждения $\dot{\Phi}_{BS}$ и соответственно уменьшается поток в воздушном зазоре $\dot{\Phi}_\delta$, вместе с тем результирующий поток, полезносцепленный с ротором $\dot{\Phi}_{B\delta}$, остается неизменным, то есть

$$\dot{\Phi}_{B\delta} = \text{const.}$$

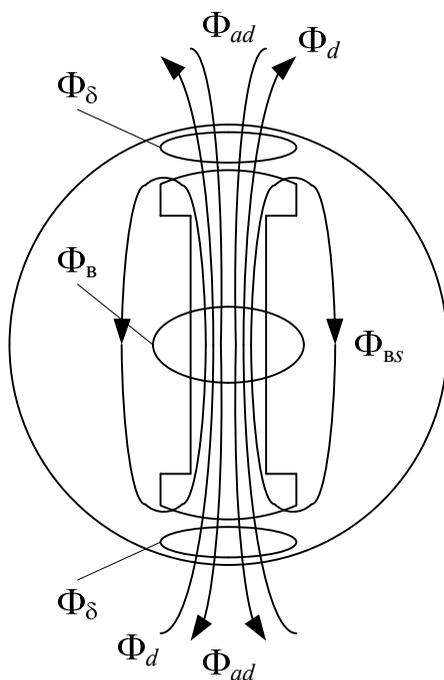


Рис. 4.1

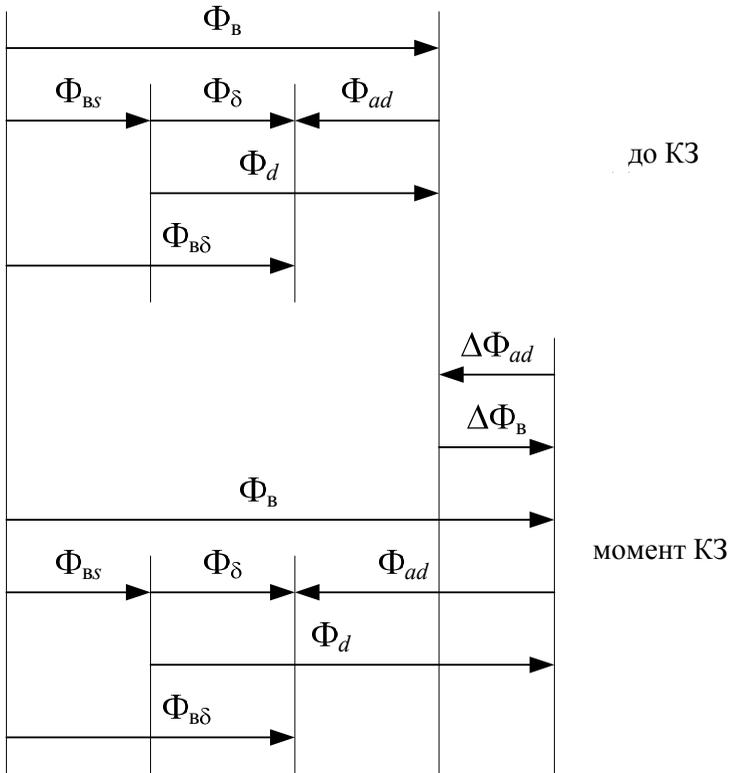


Рис. 4.2

Итак, в результате КЗ имеем:

$$\Delta\dot{\Phi}_{ad} + \Delta\dot{\Phi}_B = 0 \quad (4.1)$$

или соответственно

$$\Delta\dot{\psi}_{*ad} + \Delta\dot{\psi}_{*B} = 0, \Delta\dot{\psi}_{*ad} = -\Delta\dot{\psi}_{*B},$$

где $\Delta\psi_{*ad}$ и $\Delta\psi_{*B}$ – соответствующие приращения потокосцеплений, или

$$\Delta\dot{i}_{*c} x_{*ad} = \Delta\dot{i}_{*B} (x_{*BS} + x_{*ad}) = \Delta\dot{i}_{*B} x_{*B}; \quad (4.2)$$

$$x_{*B} = x_{*BS} + x_{*ad},$$

где x_{*BS} – сопротивление рассеяния обмотки возбуждения;

$\Delta \overset{\circ}{I}_{*B}$ – приведенное к статору приращение тока возбуждения.

Из системы относительных единиц:

$$\begin{cases} \Psi_* = \frac{U_*}{\omega_*} = \frac{I_* x_*}{\omega_*} = \frac{I_* \omega_* L_*}{\omega_*} = I_* L_* = I_* x_*; \\ E_* = I_* x_*; \Psi_* = E_*, \end{cases} \quad (4.3)$$

с другой стороны, $E_* = I_{*B} = I_{*B} x_{*ad}$ – из приведения параметров ротора к обмотке статора.

Из выражения (4.2) следует, что различие между приращением тока статора $\Delta \overset{\circ}{I}_{*c}$ и приращением тока возбуждения, приведенным к статору $\Delta \overset{\circ}{I}_{*B}$, обусловлено лишь реактивностью рассеяния обмотки возбуждения.

В ненасыщенной машине поток рассеяния $\dot{\Phi}_{BS}$ составляет некоторую величину от полного потока возбуждения $\dot{\Phi}_B$, которая называется коэффициентом рассеяния обмотки возбуждения

$$\sigma = \frac{\dot{\Phi}_{BS}}{\dot{\Phi}_B} = \frac{x_{*BS}}{x_{*B}} = \frac{x_{*BS}}{x_{*BS} + x_{*ad}}. \quad (4.4)$$

Поскольку при наличии рассеяния нельзя исследовать начальный момент переходного процесса с помощью потока $\dot{\Phi}_d$, так как его величина зависит от искомого тока КЗ, то в этом случае пользуются условием неизменности результирующего потока $\dot{\Phi}_{B\delta}$, а соответственно и потокосцепления $\dot{\Psi}_{B\delta}$, полезно сцепленного с обмоткой возбуждения, в начальный момент переходного процесса. Зная это потокосцепление и коэффициент рассеяния обмотки возбуждения, можно определить ту часть потокосцепления $\dot{\Psi}_{*B\delta}$, которая связана с обмоткой статора. Причем этой частью потокосцепления в обмотке статора

обуславливается та ЭДС E' , которая в начальный момент переходного процесса сохраняет свое предшествующее значение:

$$\begin{aligned}
 \dot{\Psi}'_{*d} &= (1 - \sigma) \dot{\Psi}_{*B\delta} = \left(1 - \frac{x_{*BS}}{x_{*BS} + x_{*ad}} \right) (\dot{\Psi}_{*B} - \dot{\Psi}_{*ad}) = \\
 &= \frac{x_{*ad}}{x_{*BS} + x_{*ad}} \left[\overset{\circ}{I}_{*B} (x_{*BS} + x_{*ad}) - \overset{\circ}{I}_{*C} x_{*ad} \right] = \\
 &= \overset{\circ}{I}_{*B} x_{*ad} - \overset{\circ}{I}_{*C} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = \overset{\circ}{I}_{*B} - \overset{\circ}{I}_{*C} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = \quad (4.5) \\
 &= \overset{\circ}{E}_* - \overset{\circ}{I}_{*C} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = \overset{\circ}{U}_* + \overset{\circ}{I}_{*C} x'_{*d} - \overset{\circ}{I}_{*C} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = \\
 &= \overset{\circ}{U}_* + \overset{\circ}{I}_{*C} x'_{*d} = \overset{\circ}{E}'_* \\
 &\quad \overset{\circ}{E}'_* = \overset{\circ}{U}_* + \overset{\circ}{I}_{*C} x'_{*d},
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 x'_{*d} &= x_{*d} - \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = x_{*S} + x_{*ad} - \frac{x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = \quad (4.6) \\
 &= x_{*S} + \frac{x_{*ad} x_{*BS} + x_{*ad}^2 - x_{*ad}^2}{x_{*BS} + x_{*ad}} = x_{*S} + \frac{x_{*ad} x_{*BS}}{x_{*BS} + x_{*ad}}; \\
 x'_{*d} &= x_{*S} + \frac{x_{*ad} x_{*BS}}{x_{*BS} + x_{*ad}}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, в начальный момент переходного процесса генератор без успокоительных обмоток характеризуется переходной ЭДС E'_* и переходным сопротивлением x'_{*d} .

В практических расчетах, когда в схеме имеется генератор без успокоительных обмоток, для определения начального тока КЗ его необходимо вводить в схему замещения переходной ЭДС E'_* и переходным сопротивлением x'_{*d} , величину которого необходимо приводить к базисным условиям.

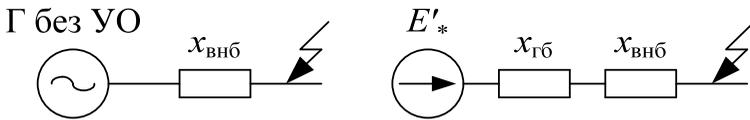


Рис. 4.3

$$x_{Гб} = x'_{*d} \frac{S_{б}}{S_{H}}$$

где x'_{*d} – переходное сопротивление генератора в относительных единицах при номинальных данных. Его величина определяется опытным путем и задается в паспортных данных генератора;

б) СМ с успокоительными обмотками (рис. 4.4).

Все генераторы уже по своей природе имеют успокоительные обмотки. У гидрогенераторов устанавливают отдельные специальные успокоительные обмотки, а у турбогенераторов роль успокоительной обмотки выполняет само тело ротора. С появлением новой обмотки появляется поток рассеяния этой обмотки и сопротивление, характеризующее этот процесс. До короткого замыкания картина магнитных потоков генератора с УО та же, что и для генератора без УО. Вместе с тем в момент нарушения режима сумма приращений всех потокосцеплений в синхронной машине должна остаться равной нулю (рис. 4.4):

$$\sum \Delta \dot{\psi} = 0;$$

$$\Delta \dot{\Phi}_{ad} = \Delta \dot{\Phi}_p = \Delta \dot{\Phi}_B + \Delta \dot{\Phi}_{YO} \quad (4.7)$$

или

$$\Delta \dot{\psi}_{ad} = \Delta \dot{\psi}_B + \Delta \dot{\psi}_{YO} = \Delta \dot{\psi}_p,$$

$$\Delta \dot{I}_{*c} x_{*ad} = \left(\Delta \dot{I}_{*B} + \Delta \dot{I}_{*YO} \right) (x_{*ps} + x_{*ad}) = \Delta \dot{I}_{*p} x_{*p}, \quad (4.8)$$

где $\Delta \dot{I}_B$, $\Delta \dot{I}_{YO}$ – приращения тока возбуждения в обмотке возбуждения и тока в успокоительной обмотке, приведенные к току статора;

$x_{*p} = x_{*ps} + x_{*ad}$ – сопротивление ротора;

x_{*ps} – сопротивление рассеяния ротора, которое определяется по формуле

$$x_{*ps} = \frac{x_{*BS} x_{*yOs}}{x_{*BS} + x_{*yOs}}, \quad (4.9)$$

где x_{*yOs} – сопротивление рассеяния успокоительной обмотки.

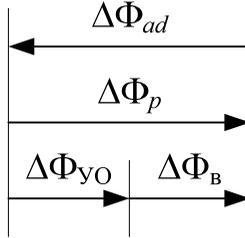


Рис. 4.4

В этом случае коэффициент рассеяния ротора

$$\sigma_p = \frac{x_{*ps}}{x_{*p}} = \frac{x_{*ps}}{x_{*ps} + x_{*ad}}. \quad (4.10)$$

Вместе с тем поток, полезно сцепленный с ротором $\dot{\Psi}_{B\delta}$, в момент нарушения режима остается неизменным, то есть $\dot{\Psi}_{B\delta} = \text{const}$, поэтому, зная его и коэффициент рассеяния ротора σ_p , можно определить то потокосцепление, которое связано со статором и которое обуславливает ЭДС E_*'' , остающуюся неизменной в начальный момент переходного процесса:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_*'' &= (1 - \sigma) \dot{\Psi}_{B\delta} = \left(1 - \frac{x_{*ps}}{x_{*ps} + x_{*ad}} \right) (\dot{\Psi}_{*B} - \dot{\Psi}_{*ad}) = \\ &= \frac{x_{*ad}}{x_{*ps} + x_{*ad}} \left[\overset{\circ}{I}_{*p} (x_{*ps} + x_{*ad}) - \overset{\circ}{I}_{*c} x_{*ad} \right] = \overset{\circ}{I}_{*p} x_{*ad} - \overset{\circ}{I}_{*c} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*ps} + x_{*ad}} = \\ &= \overset{\circ}{I}_{*p} - \overset{\circ}{I}_{*c} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*ps} + x_{*ad}} = \overset{\circ}{E}_* - \overset{\circ}{I}_{*c} \frac{x_{*ad}^2}{x_{*ps} + x_{*ad}} = \overset{\circ}{U}_* + \overset{\circ}{I}_{*c} x_{*d}'' = \overset{\circ}{E}_*'', \end{aligned}$$

$$\dot{E}_*'' = \dot{U}_* + \dot{I}_{*c} x_{*d}'', \quad (4.11)$$

где

$$\begin{aligned} x_{*d}'' &= x_{*d} - \frac{x_{*ad}^2}{x_{*ps} + x_{*ad}} = x_{*s} + x_{*ad} - \frac{x_{*ad}^2}{x_{*ps} + x_{*ad}} = \\ &= x_{*s} + \frac{x_{*ad} x_{*ps}}{x_{*ps} + x_{*ad}} = \\ &= x_{*s} + \frac{x_{*bs} x_{*yOs} x_{*ad}}{x_{*bs} x_{*ad} + x_{*yOs} x_{*ad} + x_{*bs} x_{*yOs}}, \\ x_{*d}'' &= x_{*s} + \frac{x_{*bs} x_{*yOs} x_{*ad}}{x_{*bs} x_{*ad} + x_{*yOs} x_{*ad} + x_{*bs} x_{*yOs}}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

В практических расчетах, для вычисления начального значения тока КЗ, генератор необходимо вводить в схему замещения ЭДС E_*'' и сопротивлением x_{*d}'' , величину которого требуется приводить к базисным условиям (рис. 4.5).

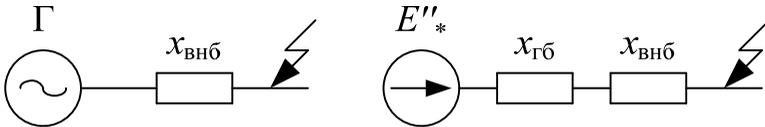


Рис. 4.5

$$x_{*гб} = x_{*d}'' \frac{S_6}{S_H},$$

где E_*'' и x_{*d}'' – соответственно сверхпереходная ЭДС и реактивность СМ.

Итак, за весь переходный процесс СМ проходит три стадии, и на каждой из них она характеризуется своими значениями ЭДС и сопротивлений:

первая стадия – сверхпереходной режим, E''_* и x''_{*d} ;
 вторая стадия – переходный режим, E'_* и x'_{*d} ;
 третья стадия – установившийся режим, $E_{*\infty}$ и x_{*d} .

4.2. Параметры синхронной машины

4.2.1. ЭДС синхронной машины

ЭДС синхронной машины можно определить для любой из стадий переходного процесса, рассмотрев ее упрощенную векторную диаграмму (рис. 4.6).

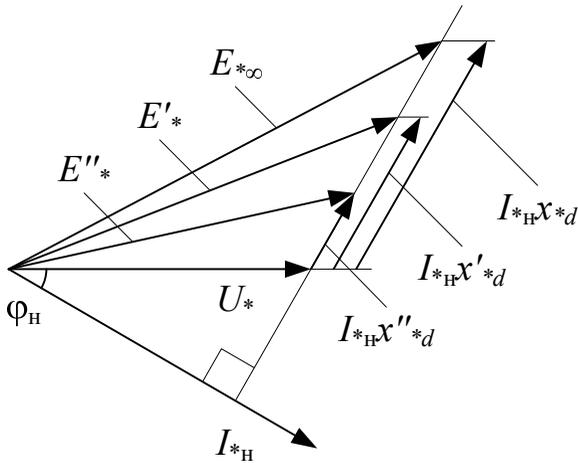


Рис. 4.6

$$\begin{aligned}
 E_{*\infty} &= \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi + I_{*H} x_{*d})^2}; \\
 E'_* &= \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi + I_{*H} x'_{*d})^2}; \\
 E''_* &= \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi + I_{*H} x''_{*d})^2}.
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

В практических расчетах кроме приведенных формул для определения E'_* и E''_* пользуются более упрощенными выражениями. За величину соответствующей ЭДС принимают величину проекции вектора ЭДС на вектор напряжения (рис. 4.7).

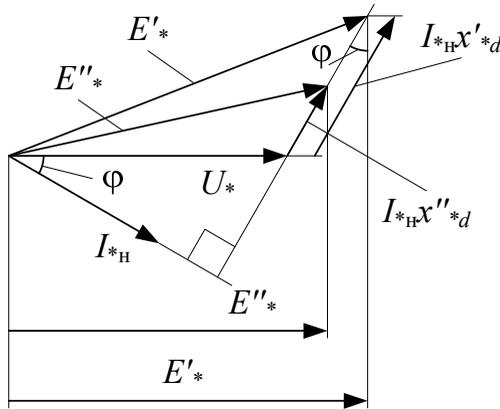


Рис. 4.7

$$E'_* = U_* + I_{*H} x'_{*d} \sin \varphi, \quad (4.14)$$

$$E''_* = U_* + I_{*H} x''_{*d} \sin \varphi.$$

4.2.2. Индуктивности (сопротивления) синхронной машины

Из приведенной схемы замещения СМ (рис. 4.8) имеем:

– для сверхпереходного режима, когда присутствует влияние успокоительной обмотки:

$$x''_{*d} = x_{*s} + \frac{x_{*BS} x_{*YO_S} x_{*ad}}{x_{*BS} x_{*ad} + x_{*YO_S} x_{*ad} + x_{*BS} x_{*YO_S}}; \quad (4.15)$$

– для переходного режима, когда влияние успокоительной обмотки заканчивается и генератор становится машиной без успокоительной обмотки, ключ K_2 отключен:

$$x'_{*d} = x_{*s} + \frac{x_{*ad} x_{*BS}}{x_{*BS} + x_{*ad}}; \quad (4.16)$$

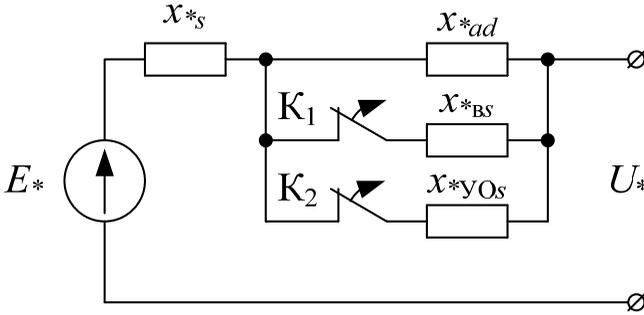


Рис. 4.8

– для установившегося режима, когда затухли свободные токи и в обмотке возбуждения, ключи K_1 и K_2 отключены:

$$x_{*d} = x_{*s} + x_{*ad}. \quad (4.17)$$

4.3. Составляющие тока короткого замыкания синхронной машины без успокоительных обмоток

Переходный процесс будем рассматривать в предположении, что СМ работает отдельно от других источников питания. Внешняя цепь статора при внезапном КЗ характеризуется некоторым постоянным индуктивным сопротивлением. В нормальном режиме в обмотке возбуждения генератора протекает постоянная составляющая тока возбуждения I_{*B} , которая наводит в обмотке статора периодически изменяющийся ток (рис. 4.9). При внезапном КЗ ток возбуждения увеличивается на величину ΔI_{*B} (рис. 4.10), которая из-за потерь в роторе затухает с постоянной времени τ' , где $\tau' = \tau_B \frac{x'_{*d}}{x_{*d}} = \frac{L_B}{R_B} \frac{x'_{*d}}{x_{*d}}$ – постоянная времени затухания свободного тока в обмотке возбуждения (рис. 4.9 и 4.10).

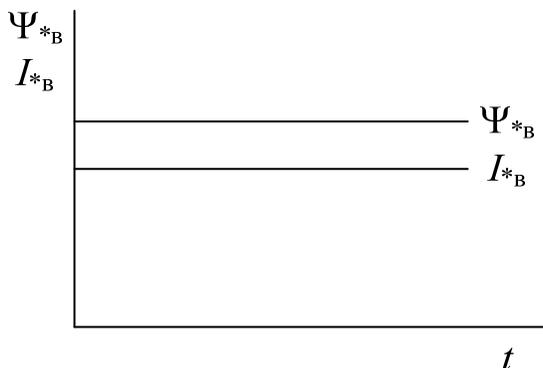


Рис. 4.9

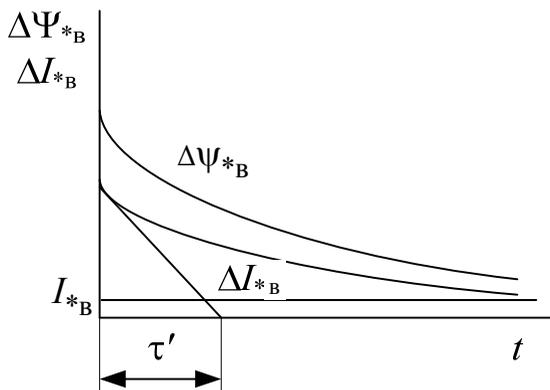


Рис. 4.10

Периодическая слагающая тока статора будет обусловлена двумя потокоцеплениями ротора и будет состоять из двух составляющих:

$$i'_{\Pi}(t) = i'_{\Pi\infty}(t) + i'_{\text{псв}}(t). \quad (4.18)$$

Полный ток КЗ будет состоять из периодической слагающей и свободного тока

$$i(t) = i'_{\Pi}(t) + i_{\text{св}}(t). \quad (4.19)$$

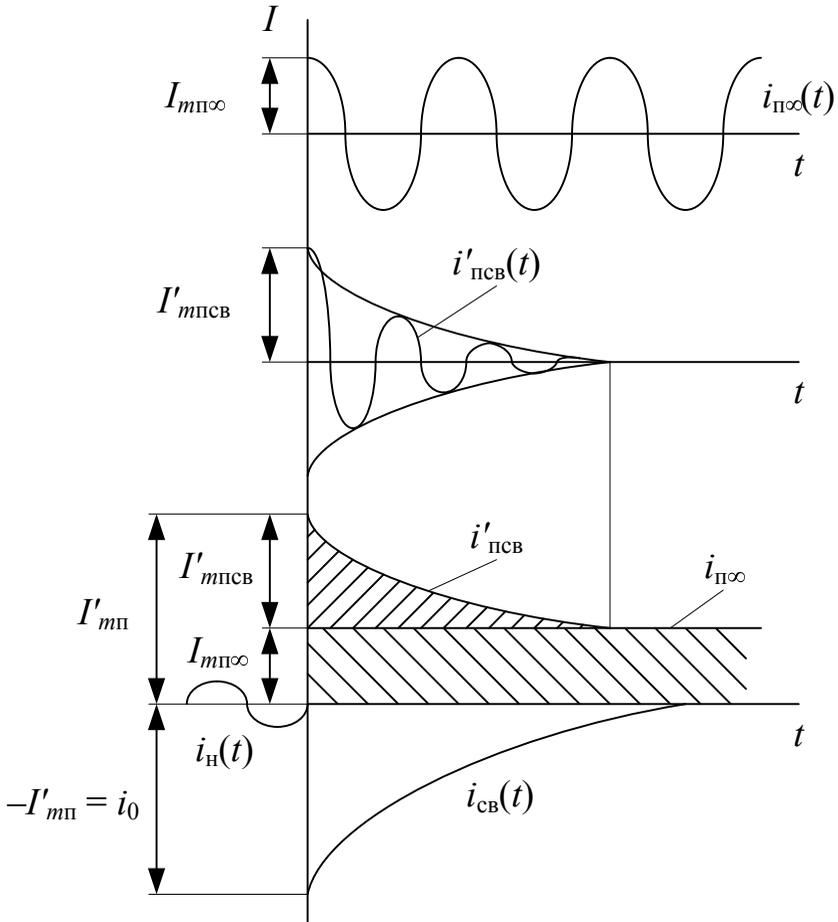


Рис. 4.11

Запишем, чему равны отдельные составляющие тока.

Максимум тока имеет место, когда $(\alpha - \varphi_{\text{К}}) = \frac{\pi}{2}$ (см. раздел 3.7).

$$\begin{aligned}
 i_{\infty}(t) &= I_{m\Pi\infty} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{К}}) = I_{m\Pi\infty} \cos \omega t = \\
 &= \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{ВН}}} \cos \omega t,
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

$$i'_{\text{ПБ}}(t) = I'_{m\text{ПБ}} e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t = (I'_{m\Pi} - I_{m\Pi\infty}) e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t =$$

$$= \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}} - \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t; \quad (4.21)$$

$$i'_{\Pi}(t) = i_{\Pi\infty}(t) + i'_{\text{ПБ}}(t) =$$

$$= \left[\frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} + \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}} - \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} \right] \cos \omega t; \quad (4.22)$$

$$i_{\text{CB}}(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau a}}. \quad (4.23)$$

Для выяснения начального значения свободной составляющей i_0 рассмотрим момент $t = 0$.

В этом случае:

$$i(0) = i'_{\Pi}(0) + i_{\text{CB}}(0);$$

$$i(0) = i_{\text{H}}(0) = 0;$$

$$i_{\text{CB}}(0) = i_0;$$

$$i_0 = -i'_{\Pi}(0) = -I'_{m\Pi} = -\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}};$$

$$i_{\text{CB}}(t) = -I'_{m\Pi} e^{-\frac{t}{\tau a}}. \quad (4.24)$$

Тогда

$$i'(t) = \left[\frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} + \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}} - \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} \right] \cos \omega t -$$

$$-\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}} e^{-\frac{t}{\tau a}}. \quad (4.25)$$

Или иначе можно записать

$$i'(t) = \left[I_{m\infty} + (I'_m - I_{m\infty}) e^{-\frac{t}{\tau'}} \right] \cos \omega t - I'_m e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \quad (4.26)$$

Из последнего выражения видно, что полный ток СМ содержит две аperiodические составляющие тока, одна из них изменяется как по периодическому, так и экспоненциальному закону, другая – только по экспоненциальному. Число свободных (аperiodических) составляющих тока равно числу обмоток СМ.

Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ

$$\tau_a = \frac{x_2}{\omega R}, \quad (4.27)$$

где x_2 – сопротивление обратной последовательности генератора;

R – активное сопротивление обмотки статора.

Для генераторов без успокоительной обмотки ток ротора состоит из трех составляющих (рис. 4.12):

$$i_p = i_B + i_{\text{всв}} + i_{\text{впсв}}. \quad (4.28)$$

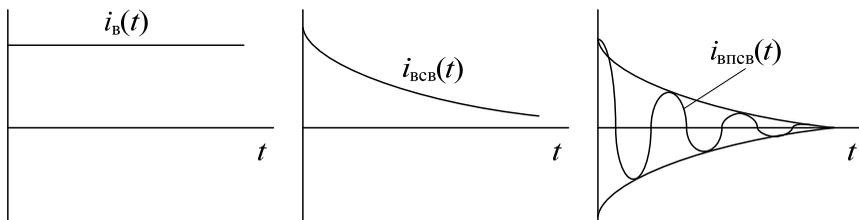


Рис. 4.12

На рис. 4.11 приведено изменение во времени составляющих тока одной фазы статора генератора при внезапном КЗ за внешним постоянным индуктивным сопротивлением при отсутствии успоко-

ительного контура на роторе (показано изменение тока $i'(t)$ для случая, когда свободная составляющая тока статора в этой фазе имеет максимальное значение в начальный момент времени).

4.4. Составляющие тока короткого замыкания синхронной машины с успокоительными обмотками

При внезапном КЗ СМ с успокоительными обмотками, на увеличение реакции статора ее ротор отвечает изменением тока в двух обмотках: увеличением тока в обмотке возбуждения на величину ΔI_{*B} , который затухает с постоянной времени τ' и увеличением тока в успокоительной обмотке на величину ΔI_{*yO} , который затухает с постоянной времени τ'' (рис. 4.13).

$$\Delta \Psi_{*B} = \Delta \Psi_{*B} e^{-\frac{t}{\tau'}}, \quad (4.29)$$

$$\Delta \Psi_{*yO} = \Delta \Psi_{*yO} e^{-\frac{t}{\tau''}}. \quad (4.30)$$

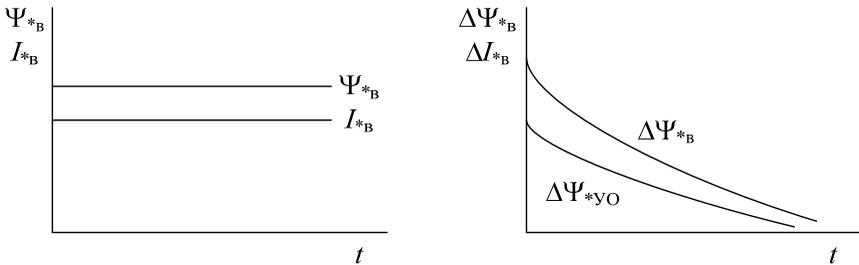


Рис. 4.13

Рассмотрим картину изменения токов статора при внезапном КЗ.

Потокоцепления, связанные с ротором, будут наводить в статоре составляющие периодического тока. Этим составляющих будет три:

$$i''_{\Pi}(t) = i_{\text{псв}}(t) + i'_{\text{псв}}(t) + i''_{\text{псв}}(t). \quad (4.31)$$

Полный ток КЗ будет состоять из периодической составляющей и свободного тока:

$$i(t) = i_{\Pi}''(t) + i_{\text{CB}}(t). \quad (4.32)$$

Запишем, чему равны отдельные составляющие тока в этом случае:

$$i_{\Pi\infty}(t) = I_{m\Pi\infty} \cos \omega t = \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} \cos \omega t; \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} i'_{\text{ПСВ}}(t) &= I'_{m\text{ПСВ}} e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t = (I'_{m\Pi} - I_{m\Pi\infty}) e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t = \\ &= \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}} - \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} \cos \omega t; \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned} i''_{\text{ПСВ}}(t) &= I''_{m\text{ПСВ}} e^{-\frac{t}{\tau''}} \cos \omega t = (I''_{m\Pi} - I'_{m\Pi}) e^{-\frac{t}{\tau''}} \cos \omega t = \\ &= \left(\frac{E''_*}{x''_{*d} + x_{*\text{BH}}} - \frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau''}} \cos \omega t; \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} i''_{\Pi}(t) &= \left[\frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} + \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}} - \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} + \right. \\ &\left. + \left(\frac{E''_*}{x''_{*d} + x_{*\text{BH}}} - \frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau''}} \right] \cos \omega t; \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$i_{\text{CB}}(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \quad (4.37)$$

Для определения значения i_0 рассмотрим момент времени $t = 0$.

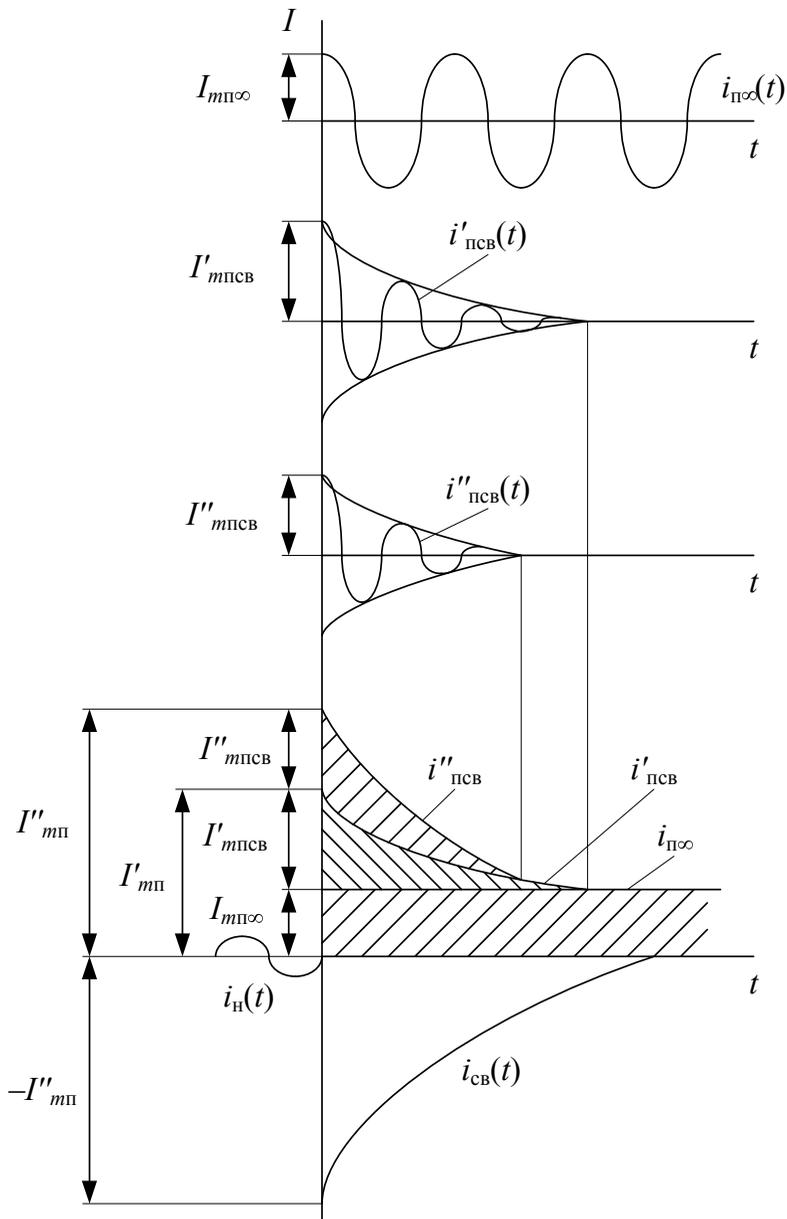


Рис. 4.14

Тогда

$$\begin{aligned}
 i(0) &= i''_{\Pi}(0) + i_{\text{CB}}(0); \\
 i(0) &= i_{\text{H}}(0) = 0, \quad i_{\text{CB}}(0) = i_0; \\
 i''_{\Pi}(0) &= I''_{m\Pi} = \frac{E''_{*m}}{x''_{*d} + x_{*\text{BH}}}; \\
 i_0 &= -i''_{\Pi}(0) = -I''_{m\Pi} = -\frac{E''_{*m}}{x''_{*d} + x_{*\text{BH}}}; \\
 i_{\text{CB}}(t) &= -\frac{E''_{*m}}{x''_{*d} + x_{*\text{BH}}} e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \tag{4.38}
 \end{aligned}$$

Закон изменения полного тока будет описываться следующим выражением:

$$\begin{aligned}
 i(t) &= \left[\frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} + \left(\frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}} - \frac{E_{*\infty}}{x_{*d} + x_{*\text{BH}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} + \right. \\
 &+ \left. \left(\frac{E''_*}{x''_{*d} + x_{*\text{BH}}} - \frac{E'_*}{x'_{*d} + x_{*\text{BH}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau''}} \right] \cos \omega t - \frac{E''_*}{x''_{*d} + x_{*\text{BH}}} e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \tag{4.39}
 \end{aligned}$$

Или иначе можно записать

$$i''(t) = \left[I_{m\infty} + (I'_m - I_{m\infty}) e^{-\frac{t}{\tau'}} + (I''_m - I'_m) e^{-\frac{t}{\tau''}} \right] \cos \omega t - I''_m e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \tag{4.40}$$

Из последнего выражения видно, что полный ток СМ содержит три аperiodические составляющие тока, две из них изменяются как по периодическому, так и по экспоненциальному закону, третья

изменяется только по экспоненциальному закону. Число свободных (апериодических) токов соответствует числу контуров (обмоток) – обмотка статора, возбуждения, успокоительная обмотка.

Постоянная времени затухания свободного тока в успокоительной обмотке

$$\tau'' = \tau' \frac{x''_{*d}}{x'_{*d}} = \tau_B \frac{x''_{*d}}{x_{*d}}. \quad (4.41)$$

Ток ротора в этом случае состоит из пяти составляющих (рис. 4.15).

$$i_p = i_B + i_{всв} + i_{впсв} + i_{уОсв} + i_{уОпсв}. \quad (4.42)$$

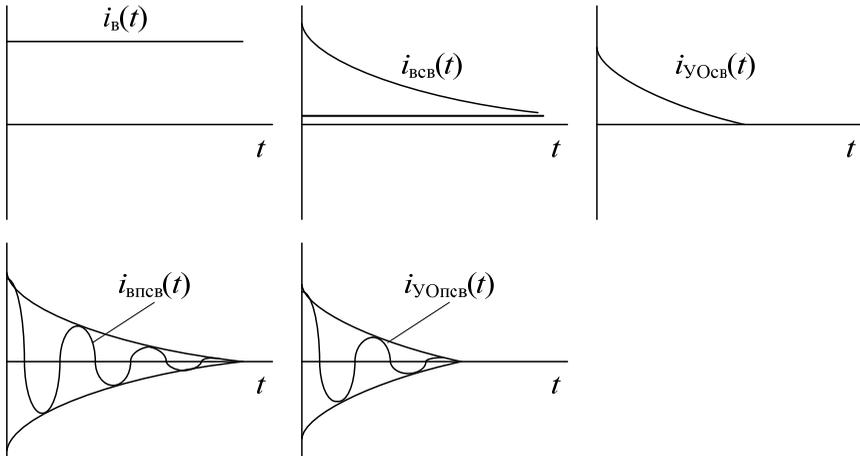


Рис. 4.15

На рис. 4.14 приведено изменение во времени составляющих тока одной из фаз статора генератора при внезапном КЗ за внешним постоянным индуктивным сопротивлением $x_{вн}$ при наличии успокоительного контура на роторе (показано изменение тока $i(t)$ и его отдельных составляющих для случая, когда свободная составляющая тока статора в этой фазе имеет максимальное значение в начальный момент времени).

5. ВЛИЯНИЕ И УЧЕТ НАГРУЗКИ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В начальный момент переходного процесса нагрузка в зависимости от места подключения ведет себя по-разному. Для выяснения влияния нагрузки в зависимости от места подключения рассмотрим следующую схему (рис. 5.1).

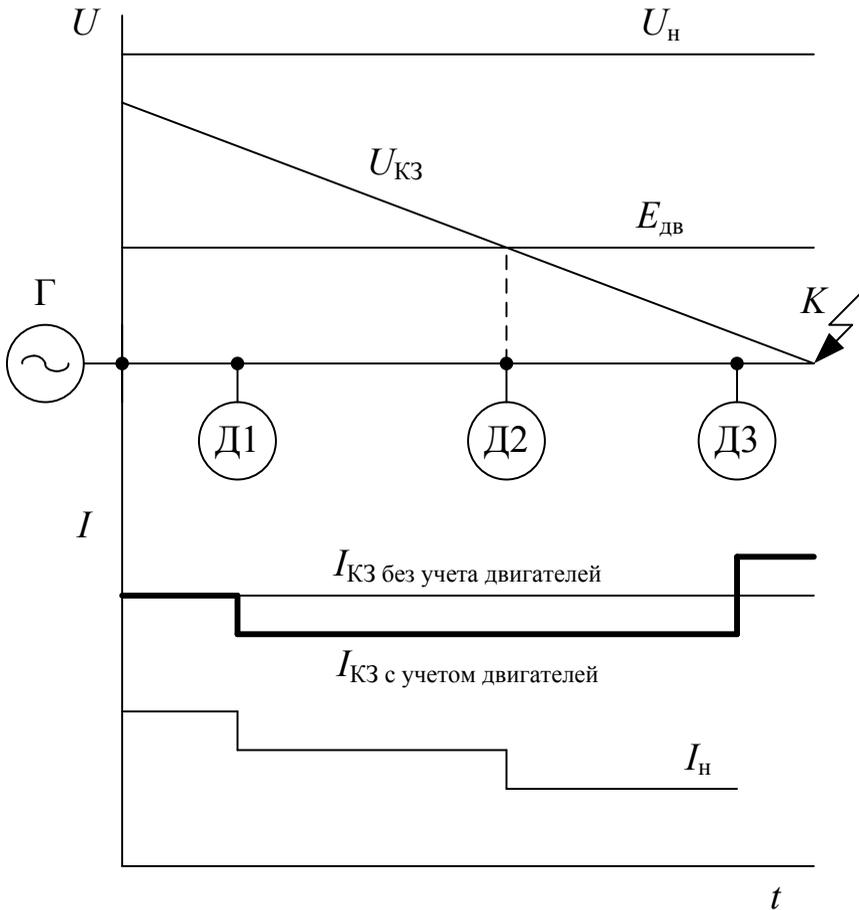


Рис. 5.1

Из рассматриваемого рисунка видно, что в зависимости от места КЗ и места подключения нагрузки она может оказывать различное влияние на величину тока КЗ. Двигатель Д1 является потребляющей ветвью, так как $U_{КЗ} > E_{дв}$, двигатель Д2 никак не влияет на величину тока КЗ, так как $U_{КЗ} = E_{дв}$, а двигатель Д3 подпитывает точку КЗ, то есть увеличивает ток КЗ, так как $E_{дв} > U_{КЗ}$.

В связи с изложенным, в первую очередь в начальный момент переходного процесса учету подлежит нагрузка, подключенная вблизи места повреждения. Чтобы установить, в каких случаях нагрузка переходит в начальный момент переходного процесса в генераторный режим, исследовалась следующая схема (рис. 5.2).

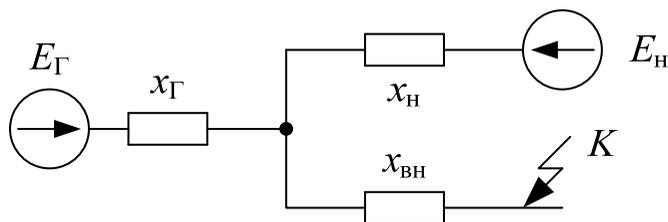


Рис. 5.2

Было установлено, что при $x_{*BH} = 0,46$ нагрузка не влияет, при меньших значениях подпитывает точку КЗ, при больших значениях потребляет ток от генератора и уменьшает ток КЗ.

$x_{*BH} = 0,46$ – сопротивление внешней сети (от точки КЗ до места подключения нагрузки), выраженное в относительных единицах при номинальных данных нагрузки. Если $x_{*BH} < 0,46$, то следует учитывать нагрузку, при значениях $x_{*BH} > 0,46$ нагрузку можно не учитывать (рис. 5.3).

Всю нагрузку, которая подлежит учету в начальный момент переходного процесса, можно разделить на три группы: СД и СК, крупные АД, обобщенная мелкомоторная нагрузка.

Синхронные двигатели (СД) и синхронные компенсаторы (СК), если они в начальный момент КЗ работали в режиме перевозбуждения, учитываются точно так же, как и синхронные генераторы, то есть сверхпереходной ЭДС $E'' = U_* + I_{*H} x''_{*d} \sin \varphi$ и сопротивле-

нием $x_{*d}'' \frac{S_{\delta}}{S_H}$. Если СД и СК работали с недозвуждением, то их

ЭДС была меньше подведенного напряжения, то есть $E'' = U_* - I_{*H} x_{*d}'' \sin \varphi$ и они, в зависимости от места подключения, могут либо подпитывать точку КЗ, либо отсасывать ток КЗ от аварийной ветви.

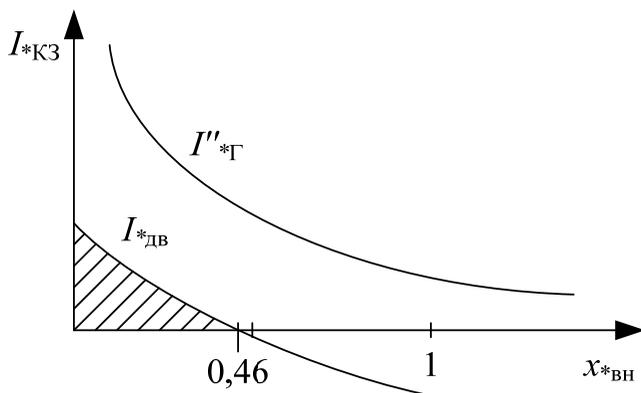


Рис. 5.3

Крупные асинхронные двигатели ($P > 100$ кВт), в зависимости от места подключения, учитываются сверхпереходной ЭДС $E''_{ДВ}$ и сверхпереходным сопротивлением, которое необходимо привести к базисным условиям:

$$x_{*ДВ}'' = \frac{1}{I_{*пуск}}$$

ЭДС $E''_{ДВ}$ определяется из векторной диаграммы двигателя.

$$E''_{ДВ} = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi - I_{*H} x_{*ДВ}'')^2} \quad (5.1)$$

или упрощенно

$$E''_{ДВ} \cong U_* - I_{*H} x_{*ДВ}'' \sin \varphi, \quad (5.2)$$

если за величину ЭДС брать проекцию вектора $E''_{дв}$ на вектор напряжения.

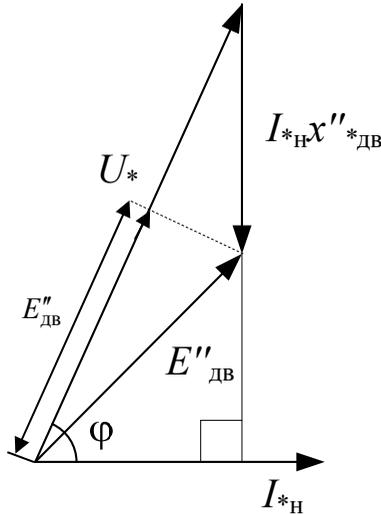


Рис. 5.4

Мелкомоторная (обобщенная) нагрузка учитывается в практических расчетах, с учетом ее места подключения, обобщенными параметрами $E''_{*н} = 0,85$ и $x_{*н} = 0,35$, которое необходимо приводить к базисным условиям.

В начальный момент КЗ нельзя при расчете тока объединять (эквивалентировать) ветви нагрузки с генераторными ветвями. Это объясняется тем, что значение ударного коэффициента k_y для генераторных и нагрузочных ветвей различно. В первую очередь это относится к нагрузочным ветвям, подключенным в точке КЗ (рис. 5.5).

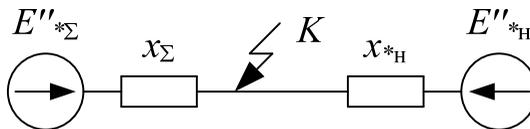


Рис. 5.5

$$I_*'' = I_{*\Gamma}'' + I_{*H}'';$$

$$I_{*H}'' = \frac{E_{*H}''}{X_{*H}};$$

$$I_{\Gamma}'' = I_{*\Gamma}'' \cdot I_{\bar{0}};$$

$$I_H'' = I_{*H}'' \cdot I_{\bar{0}};$$

$$i_y = \sqrt{2} (k_{y\Gamma} I_{\Gamma}'' + k_{yH} I_H'').$$

Для нагрузочной ветви, основу которой составляет СД и СК, $k_{yH} = 1,75-1,9$, для крупных АД $k_{yH} = 1,4-1,6$, для мелкомоторной (обобщенной) нагрузки $k_{yH} = 1$.

6. УЧЕТ СИСТЕМЫ БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В реальных схемах отдельные источники могут быть настолько удалены от места КЗ, что они никаким образом не реагируют на протекание переходного процесса, то есть их параметры в течение всего переходного процесса остаются неизменными. Такие источники называются системой бесконечной мощности. Примером такого источника могут служить шины подстанций 10 кВ при КЗ в сети 0,4 кВ (рис. 6.1).

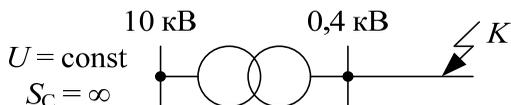


Рис. 6.1

Если рассматривается КЗ в сложной схеме, то такую схему следует разделить на две части, выделив отдельные источники в систему бесконечной мощности, а остальные при этом будут учитываться своими параметрами в соответствии с рассматриваемой стадией переходного процесса (рис. 6.2).

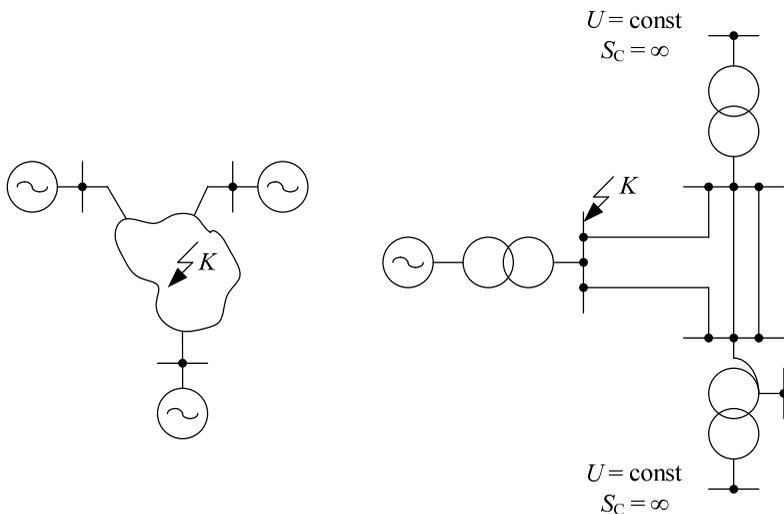


Рис. 6.2

Возможны три способа задания системы бесконечной мощности:

1. Задается конечная мощность системы и ее сопротивление в относительных единицах, приведенное к ее мощности (рис. 6.3).

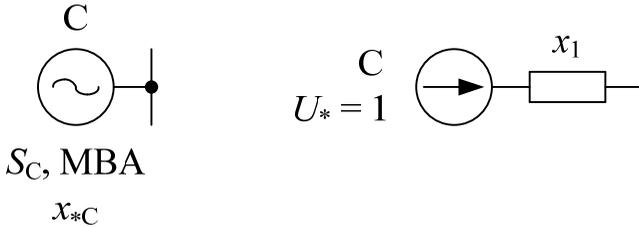


Рис. 6.3

$$x_1 = x_{*C} \frac{S_{\delta}}{S_C}.$$

2. Задается мощность короткого замыкания на шинах системы (рис. 6.4).

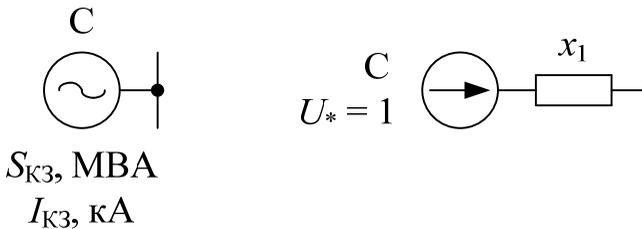


Рис. 6.4

$$x_1 = \frac{S_{\delta}}{S_{КЗ}} = \frac{I_{\delta}}{I_{КЗ}}, \quad x_C = \frac{U_{срн}}{\sqrt{3}I_{КЗ}} = \frac{U_{срн}^2}{S_{КЗ}}, \quad (6.1)$$

$$x_{*C} = x_C \frac{S_{\delta}}{U_{срн}^2}, \quad x_{*C} = \frac{U_{срн}^2}{S_{КЗ}} \frac{S_{\delta}}{U_{срн}^2} = \frac{S_{\delta}}{S_{КЗ}} = x_1.$$

В качестве мощности КЗ системы $S_{\text{КЗ}}$ часто применяется мощность отключения выключателя, установленного на подстанции, соединяющей рассматриваемую часть системы и систему бесконечной мощности.

3. Бывают случаи, когда о таком источнике известно лишь то, что в данной точке системы (схемы сети) параметры остаются неизменными при КЗ в любой точке остальной сети, то есть эта шина (точка) считается системой бесконечной мощности $S_{\text{C}} = \infty$ (рис. 6.5).

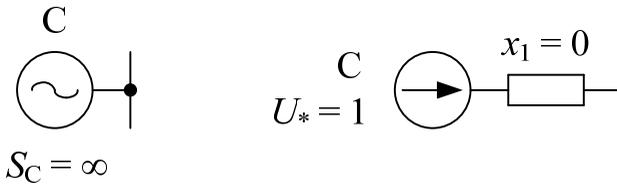


Рис. 6.5

В силу того, что напряжение на шинах системы бесконечной мощности остается постоянным в течение всего переходного процесса, то и ток от этого луча для любого момента времени будет определяться одинаково:

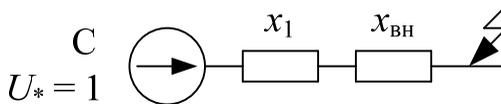


Рис. 6.6

$$I_*'' = I_*' = I_{*\infty} = \frac{U_*}{x_1 + x_{\text{ВН}}} = \frac{1}{x_1 + x_{\text{ВН}}}.$$

7. ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В реальных схемах с несколькими генераторами точный расчет процесса КЗ чрезвычайно сложен. Изменения свободных токов в каждом из генераторов взаимосвязаны друг с другом. При наличии АВР взаимная связь имеет место и в изменениях периодических составляющих токов. Поэтому в тех случаях, когда не требуется большой точности результатов расчета, используются практические методы, которые позволяют с приемлемой точностью (ошибка 10–15 %) вычислить значение тока в аварийной ветви в произвольный момент переходного процесса.

7.1. Метод расчетных кривых

Периодическая составляющая тока КЗ в любой момент времени после появления КЗ может быть рассчитана с использованием специально построенных кривых.

Расчетные кривые представляют собой зависимость относительного значения периодической составляющей тока КЗ от времени переходного процесса и электрической удаленности точки КЗ от источника питания, то есть

$$I_{*пт} = f(t, x_{*расч}). \quad (7.1)$$

Расчетные кривые построены для типовых ТГ и ГГ с АВР и без АВР и имеют вид, представленная на рис. 7.1.

Для построения расчетных кривых использовалась следующая схема изображена на рис. 7.2.

Здесь принято, что генератор до КЗ работал с номинальной нагрузкой и $\cos \varphi = 0,8$. Удаленность точки КЗ учитывалась величиной $x_{*вн}$:

$$x_{*расч} = x_{*d}'' + x_{*вн}, \quad (7.2)$$

где $x_{*расч}$ – сопротивление луча, приведенное к номинальным данным, то есть

$$x_{*расч} = x_{*б} \frac{S_H}{S_б}$$

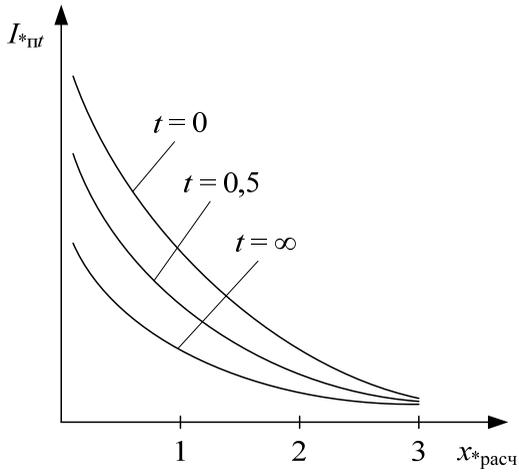


Рис. 7.1

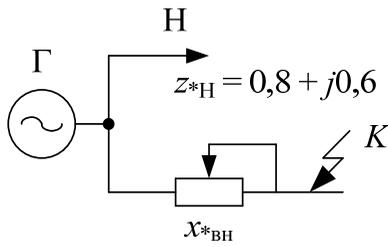


Рис. 7.2

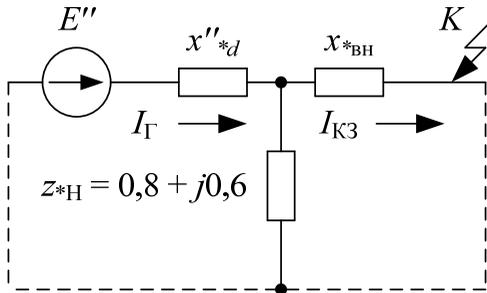


Рис. 7.3

Кривые построены для $x_{*расч} \leq 3$, так как при $x_{*расч} > 3$ периодическая составляющая тока КЗ изменяется столь незначительно, что источник, удаленный от точки КЗ на такую величину сопротивления, представляет собой не что иное, как систему бесконечной мощности. И поэтому ток от него для любого момента времени одинаков (кривые сливаются в одну):

$$I''_{*п} = I'_{*п} = I_{*пl=\infty} = \frac{U_*}{x_{*расч}} = \frac{1}{x_{*расч}}. \quad (7.3)$$

7.2. Порядок расчета переходных процессов по расчетным кривым

7.2.1. Расчет по общему затуханию

При расчете по общему затуханию не учитывают разноудаленность генераторов от места повреждения и их разнотипность. Значит в процессе преобразования схемы замещения все генераторы могут быть заменены одним эквивалентным генератором суммарной мощности.

1. Для заданной расчетной схемы энергосистемы составляют схему замещения, в которую генераторы вводят сопротивлениями x''_{*d} и на генераторных лучах записывают полную мощность генератора, то есть S (МВА). Нагрузки не учитываются (отбрасываются), так как они учтены при построении кривых.

2. Задаются базисными условиями $S_б$ и $U_б = U_{срн}$. Приводят сопротивления всех элементов схемы замещения, в том числе и x''_{*d} , к принятым базисным условиям.

3. Сворачивают схему к простейшему виду (рис. 7.4), используя методы преобразования схем.

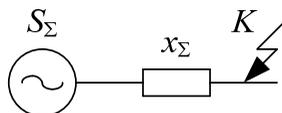


Рис. 7.4

$$S_{\Sigma} = S_1 + S_2 + \dots + S_n \text{ МВА.}$$

4. Для того чтобы воспользоваться расчетными кривыми, сопротивление x_{Σ} , определенное при базисных условиях, пересчитывают к номинальным условиям, так как для них построены кривые

$$x_{\Sigma\text{расч}} = x_{\Sigma} \frac{S_{\Sigma}}{S_{\text{б}}}. \quad (7.4)$$

5. Зная $x_{\Sigma\text{расч}}$ и используя кривые для типа генераторов, мощность которых в схеме преобладает, определяют относительное значение периодической составляющей тока КЗ для интересующих моментов времени $I_{*\text{пт}}$. Если $x_{\Sigma\text{расч}} > 3$, то периодическая составляющая тока КЗ для любого момента времени определяется как

$$I''_{*\text{пт}} = I'_{*\text{пт}} = I_{*\text{пт}/\infty} = \frac{1}{x_{\Sigma\text{расч}}}. \quad (7.5)$$

6. Определяют действительное значение периодической составляющей тока для интересующих моментов времени:

$$I_{\text{пт}} = I_{*\text{пт}} I_{\text{н}\Sigma}, \text{ кА}, \quad (7.6)$$

где $I_{\text{н}\Sigma} = \frac{S_{\Sigma}}{\sqrt{3}U_{\text{ср н}}}$ – номинальный суммарный ток всех генераторов,

приведенный к среднономинальному напряжению той ступени, на которой находится точка КЗ.

Если в схеме имеется источник, представляющий собой систему бесконечной мощности, то его следует выделить в отдельную ветвь, используя метод коэффициентов токораспределения.

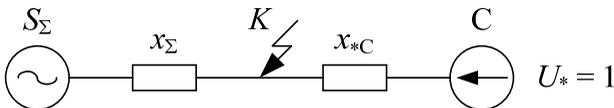


Рис. 7.5

7. Ток от луча системы определится как

$$I_{*c} = \frac{U_*}{x_{*c}};$$

$$I_c = I_{*c} I_{\sigma}, \text{ кА}, \quad (7.7)$$

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\text{ср н}}}, \text{ кА}.$$

где $U_{\text{ср н}}$ – напряжение той ступени, на которой находится точка КЗ.

8. Для уточнения тока КЗ в начальный (сверхпереходный режим, $t = 0$) момент КЗ учитывают сверхпереходный ток от луча нагрузки, подключенной к месту КЗ (рис. 7.6).

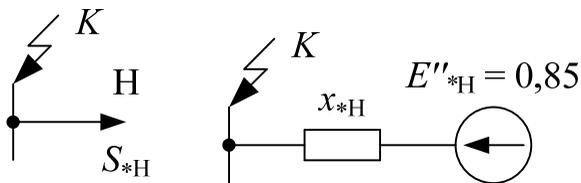


Рис. 7.6

$$I''_{*H} = \frac{E''_{*H}}{x_{*H}};$$

$$I''_H = I''_{*H} I_{\text{нн}} \text{ (кА)}; \quad (7.8)$$

$$I_{\text{нн}} = \frac{S_{\text{нн}}}{\sqrt{3}U_{\text{ср н}}} \text{ (кА)},$$

где $U_{\text{ср н}}$ – напряжение в точке КЗ;

$S_{\text{нн}}$ – номинальная мощность нагрузки.

7.2.2. Расчет с учетом индивидуальных коэффициентов затухания

Для повышения точности расчета при расчете по расчетным кривым необходимо учитывать каждый из генераторов в точке КЗ обособленно. Допускается в отдельных случаях эквивалентировать однотипные генераторы (согласно рис. 7.7), если соблюдаются следующие условия:

$$0,4 \leq \frac{S_1 x_1}{S_2 x_2} \leq 2,5.$$

$$S_3 = S_1 + S_2,$$

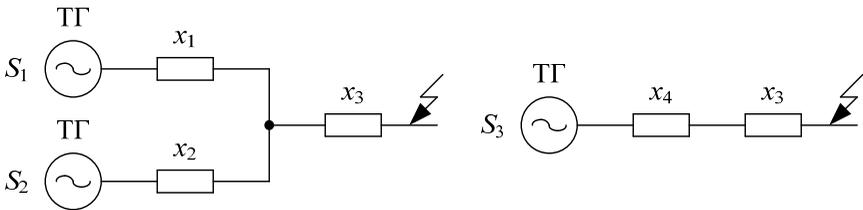


Рис. 7.7

В самом общем случае имеем схему энергосистемы (рис. 7.8).

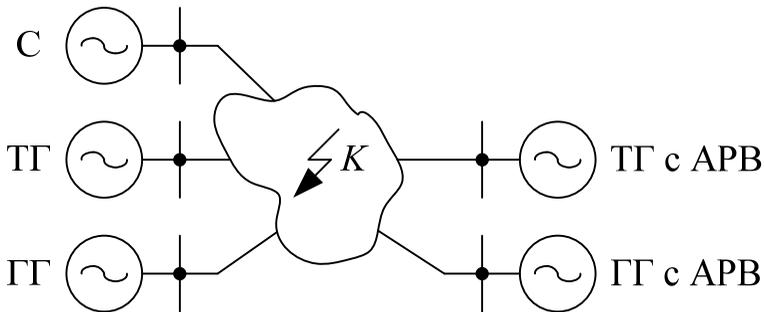


Рис. 7.8

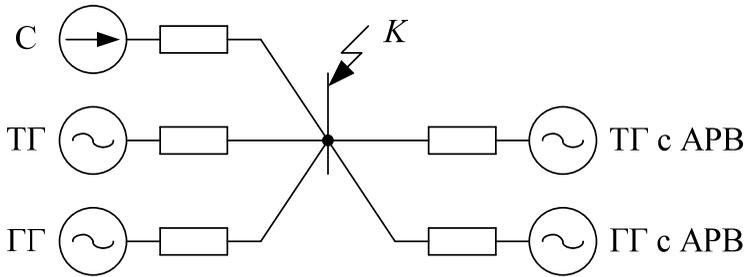


Рис. 7.9

Порядок расчета с учетом индивидуальных коэффициентов затухания, учитывающих разнотипность и разноудаленность источников питания от места повреждения, следующий:

1. Выясняют возможность эквивалентирования однотипных генераторов (рис. 7.10).

Все генераторы однотипны и одинаковой мощности. При КЗ в K_1 и K_2 генераторы Γ_1 и Γ_2 можно заменить одним суммарной мощности и эквивалентным сопротивлением. Генератор Γ_2 при этом находится в особых (отличных) условиях. При КЗ в точках K_3 и K_4 все генераторы находятся в особых условиях, отличных друг от друга, и поэтому объединение (эквивалентирование) не допускается.

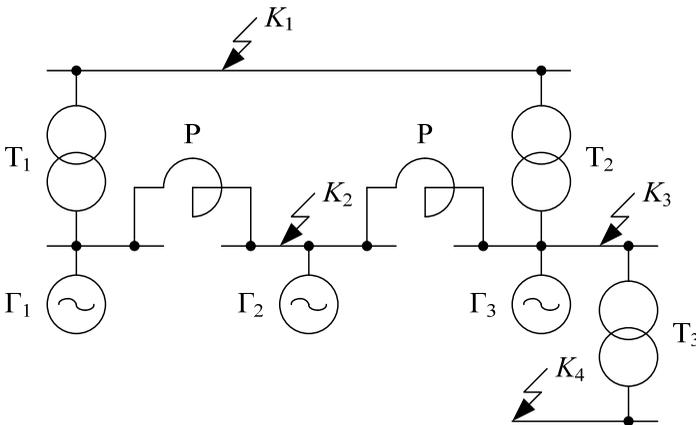


Рис. 7.10

2. Задаются базисными условиями, составляют схему замещения, параметры всех элементов приводят к принятым базисным условиям. В схему замещения генераторы вводятся сверхпереходными сопротивлениями x_{*d}'' , нагрузки не учитываются, аналогично, как и при расчете по общему затуханию.

3. Используя известные методы преобразования схем, схему замещения приводят к простейшему виду (рис. 7.11).

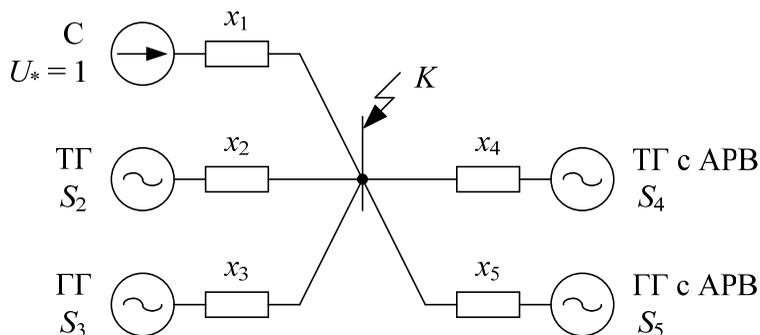


Рис. 7.11

4. Определяют расчетные значения сопротивлений каждого из лучей, исключая луч системы

$$x_{\text{расч.}i} = x_i \frac{S_i}{S_6}$$

5. Зная $x_{\text{расч.}i}$ и используя соответствующие расчетные кривые, определяют относительные значения периодических составляющих токов для интересующих нас моментов времени, для каждого из лучей, исключая луч системы (рис. 7.12).

Если $x_{\text{расч.}i} > 3$, то значение периодической составляющей тока для любого момента времени будет определяться как

$$I_{*птi} = \frac{1}{x_{\text{расч.}i}}$$

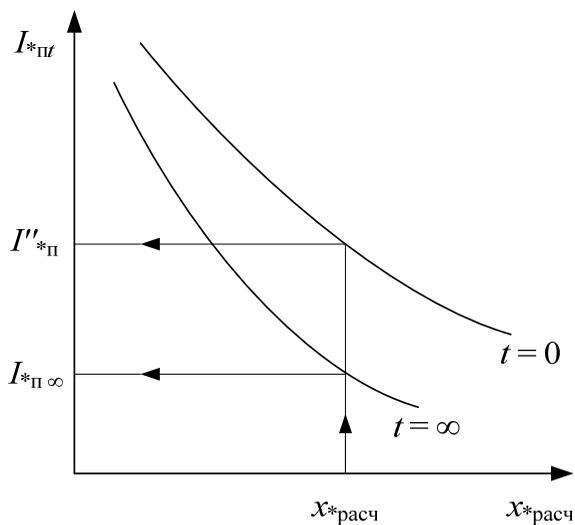


Рис. 7.12

6. Определяют номинальные токи каждого из лучей, приведенные к той ступени напряжения, на которой находится точка КЗ:

$$I_{\Pi i} = \frac{S_{\Pi i}}{\sqrt{3}U_{\text{срн}}}, \text{ кА.}$$

7. Определяют относительное значение тока для любого момента времени от луча системы:

$$I_{*Ct} = \frac{1}{x_1}.$$

8. Определяют базисный ток:

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{срн}}}, \text{ кА.}$$

9. Определяют действительные значения тока КЗ в точке для интересующих нас моментов времени:

$$I'' = I_{пт=0} = \sum_{i=1}^n I_{*пт=0i} I_{нi} + I_{*Ct} I_{\sigma}, \text{ кА}; \quad (7.9)$$

$$I_{\infty} = I_{пт=\infty} = \sum_{i=1}^n I_{*пт=\infty i} I_{нi} + I_{*Ct} I_{\sigma}, \text{ кА}; \quad (7.10)$$

$$i_y = \sqrt{2} k_y I'' = \sqrt{2} \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau_a}} \right) I'', \text{ кА}. \quad (7.11)$$

Величиной k_y учитывается наличие свободной составляющей тока в полном токе.

7.3. Расчет токов короткого замыкания по методу типовых кривых

Для выбора коммутационной аппаратуры (выключателей) при проектировании станций и подстанций необходимо знать значения токов КЗ для момента времени отключения КЗ. Для сложных схем при расчете периодической составляющей токов КЗ для времени $t \leq 0,5$ с рекомендуется использовать метод типовых кривых.

Типовые кривые (рис. 7.13) используют при определении действующего значения периодической составляющей тока КЗ для моментов времени до 0,5 с и удаленности точки КЗ от источника питания

$\frac{I''_{п\Gamma}}{I_{\Gamma \text{ ном}}} \geq 2$, то есть когда точка КЗ находится на выводах генератора

или за трансформатором связи с энергосистемой. При $\frac{I''_{п\Gamma}}{I_{\Gamma \text{ ном}}} < 2$

точка КЗ является электрически удаленной и в этом случае:

$$I''_{п\Gamma} = I_{пт} = I_{п\infty}.$$

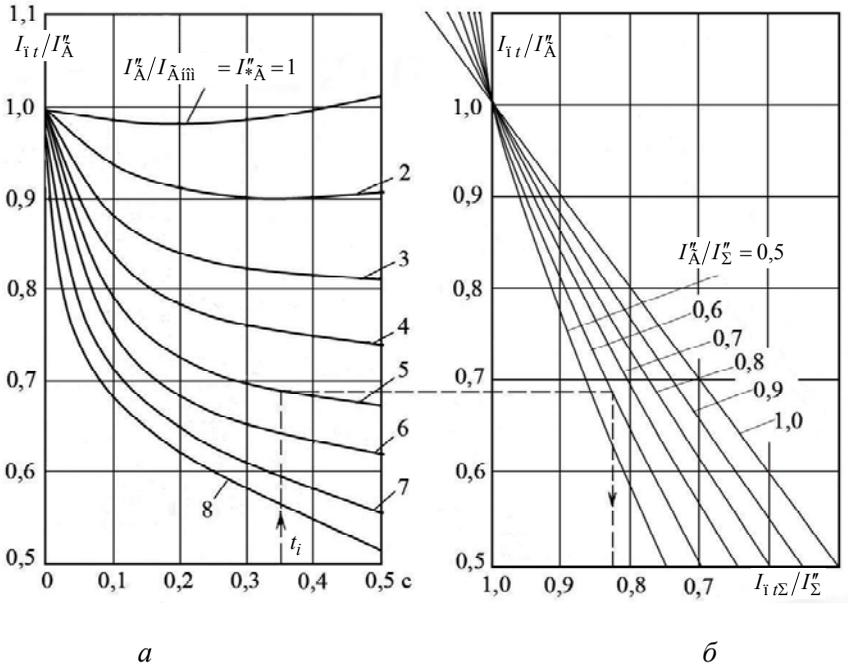


Рис. 7.13

Типовые кривые имеют вид (рис. 7.13, а)

$$\frac{I_{пт}}{I_{\Gamma}''} = f(t) \quad \text{при} \quad \frac{I_{\Gamma}''}{I_{\Gamma \text{ ном}}''} = \text{var},$$

и семейство дополнительных зависимостей (рис 7.13, б)

$$\frac{I_{пт\Sigma}}{I_{\Sigma}''} = f\left(\frac{I_{пт}}{I_{\Gamma}''}\right) \quad \text{при} \quad \frac{I_{\Gamma}''}{I_{\Sigma}''} = \text{var},$$

где I_{Γ}'' , $I_{пт}$ – соответственно сверхпереходной ток генератора и периодическая составляющая сверхпереходного тока для момента времени t в генерирующей ветви;

$I_{\Gamma \text{ ном}}$ – номинальный ток генератора (источника), приведенный к ступени напряжения в точке КЗ:

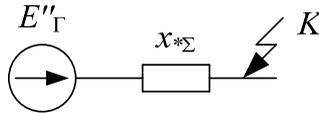
$$I_{\Gamma \text{ ном}}'' = \frac{S_{\text{пг}}}{\sqrt{3}U_{\text{ср н}}};$$

$I_{\text{пг}}''$ – суммарный сверхпереходный ток от всех источников (генераторы и система);

$I_{\text{пт}\Sigma}$ – периодическая составляющая тока КЗ в момент времени t , создаваемая всеми источниками.

Для ветви независимого питания генератором точки КЗ, периодическую составляющую тока КЗ определяют в следующем порядке:

1. Составляют схему замещения и определяют $x_{*\Sigma}$ до точки КЗ (генератор в схему замещения вводят сопротивлением x_{*d} , нагрузку не учитывают).



2. Определяют $I_{\text{пг}}''$ в месте КЗ

$$I_{\text{пг}}'' = \frac{E''_{\Gamma}}{x_{*\Sigma}} I_{\text{б}}, \text{ кА.} \quad (7.12)$$

3. Определяют электрическую удаленность точки КЗ $\frac{I_{\text{пг}}''}{I_{\Gamma \text{ ном}}''}$, если это число получается дробным, то его округляют до ближайшего целого, или производят интерполяцию кривых.

4. Зная это отношение (удаленность) и интересующий момент времени t , по кривым определяют (рис. 7.13, а) отношение

$$\frac{I_{\text{пт}}}{I_{\text{пг}}''}. \quad (7.13)$$

5. Периодическая составляющая тока КЗ в момент времени t будет

$$I_{пт} = \left(\frac{I_{пт}}{I''_{п\Gamma}} \right) I''_{п\Gamma}. \quad (7.14)$$

Аналогично можно использовать типовые кривые для расчета периодической составляющей тока КЗ в случае питания точки КЗ несколькими независимыми генерирующими ветвями. В этом случае $I_{пт} = \sum_{i=1}^n I_{пт_i}$, где i – количество отдельных ветвей.

6. Определяют значение аperiodической (свободной) составляющей тока в момент времени t

$$i_a(t) = \sqrt{2} I''_{п\Gamma} e^{-\frac{t}{\tau_a}}, \quad (7.15)$$

где

$$\tau_a = \frac{x_{\Sigma}}{\omega R_{\Sigma}}; \quad (7.16)$$

x_{Σ} , R_{Σ} – соответственно индуктивное и активное сопротивление суммарной питающей ветви.

Если питание точки КЗ осуществляется от n источников, то

$$i_a(t) = \sum_{i=1}^n i_a(t)_i = \sum_{i=1}^n I''_{п\Gamma_i} e^{-\frac{t}{\tau_{ai}}}. \quad (7.17)$$

Если связь генератора и системы с точкой КЗ осуществляется через общее сопротивление $x_{*к}$, а удаленность точки КЗ от генератора такова, что $\frac{I''_{п\Gamma}}{I_{\Gamma \text{ ном}}} > 2$, то необходимо учитывать изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока от генератора в точке КЗ (рис. 7.14).

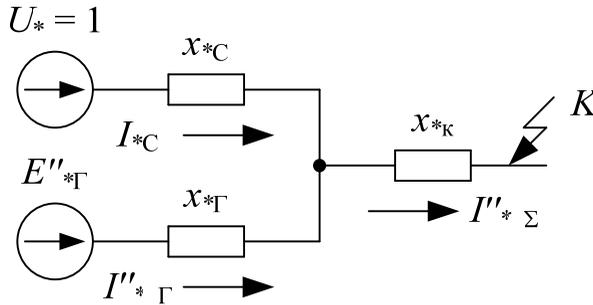


Рис. 7.14

В этом случае расчет выполняют в следующем порядке:

1. Составляют схему замещения, преобразовывают ее и находят E''_{Σ} , $x_{*\text{рез}}$ и I''_{Σ} (рис. 7.15).

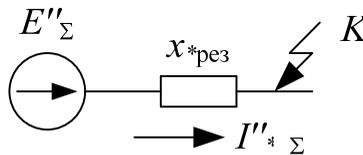


Рис. 7.15

$$I''_{\text{п}\Sigma} = \frac{E''_{\Sigma}}{x_{*\text{рез}}} I_6, \text{ кА.} \quad (7.18)$$

2. Определяют начальное значение периодической составляющей тока в ветви генератора

$$I''_{\text{п}\Gamma} = \frac{E''_{*\Gamma} I_6 - I''_{\text{п}\Sigma} x_{*K}}{x_{*\Gamma}}, \text{ кА.} \quad (7.19)$$

3. Определяют отношения

$$\frac{I''_{\text{п}\Gamma}}{I_{\Gamma \text{ ном}}} \text{ и } \frac{I''_{\text{п}\Gamma}}{I''_{\Sigma}}.$$

4. По кривой $\frac{I_{пт}}{I_{пГ}''} = f(t)$ при известном значении $\frac{I_{пГ}''}{I_{Г\text{ ном}}}$ для расчетного момента времени t находят отношение $\frac{I_{пт}}{I_{пГ}''}$ и по нему и кривой со значением $\frac{I_{пГ}''}{I_{п\Sigma}''}$ устанавливают значение $\frac{I_{пт\Sigma}}{I_{п\Sigma}''}$ (см. рис. 7.13).

5. По найденному отношению и известному току $I_{п\Sigma}''$ вычисляют периодическую составляющую тока КЗ для интересующего момента времени t :

$$I_{пт\Sigma} = \left(\frac{I_{пт\Sigma}}{I_{п\Sigma}''} \right) I_{п\Sigma}'' \quad (7.20)$$

Метод типовых кривых следует применять при сравнительно небольших удаленностях точки КЗ от генераторов. Если источники удалены от места КЗ настолько, что ток ближайшего источника в момент КЗ выше номинального не более чем в 2 раза, $\left(\frac{I_{пГ}''}{I_{Г\text{ ном}}} \right) < 2$, то все источники в процессе преобразования схемы можно заменить одним эквивалентным и периодическую составляющую тока КЗ можно считать неизменной во времени.

8. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Рассмотрение переходного процесса при несимметричном КЗ ограничивается условием, что несимметрия возникает только в одном месте схемы, а остальная ее часть остается симметричной. Для расчета несимметричных КЗ в многофазных схемах используют метод симметричных составляющих, в соответствии с которым вычисление токов и напряжений при несимметричном КЗ в месте повреждения сводится к вычислению симметричных составляющих этих величин. Метод симметричных составляющих позволяет разложить любую несимметричную систему векторов на три симметричные составляющие векторов прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 8.1).

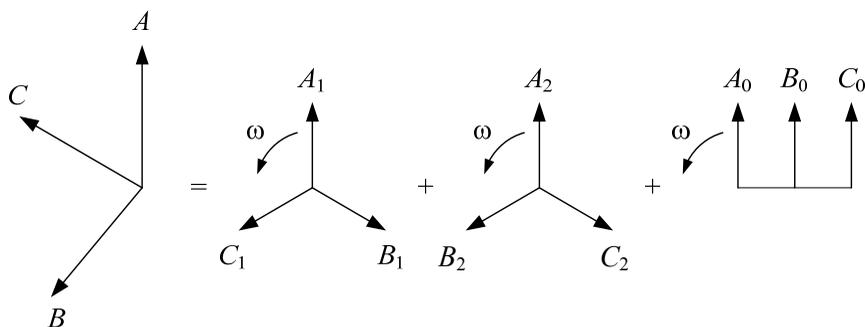


Рис. 8.1

ω – направление и частота вращения векторов.

Если известны векторы отдельных последовательностей, то легко определить векторы несимметричной системы:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{B} &= \dot{B}_1 + \dot{B}_2 + \dot{B}_0; \\ \dot{C} &= \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_0. \end{aligned} \tag{8.1}$$

Введение специального фазного оператора a позволяет векторам каждой симметричной системы выразить через какой-либо один вектор той же системы. Фазный оператор является вектором, модуль которого равен 1, а аргумент 120° . Умножить на a – это означает повернуть вектор на 120° против часовой стрелки.

$$\begin{aligned}\dot{B}_1 &= a^2 \dot{A}_1, & \dot{C}_1 &= a \dot{A}_1; \\ \dot{B}_2 &= a \dot{A}_2, & \dot{C}_2 &= a^2 \dot{A}_2; \\ \dot{A}_0 &= \dot{B}_0 = \dot{C}_0.\end{aligned}\tag{8.2}$$

Основные свойства фазного оператора « a »:

$$\begin{aligned}a &= e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}; \\ a^3 &= e^{j360^\circ} = 1;\end{aligned}\tag{8.3}$$

$$a^2 + a + 1 = 0, \quad a^2 - a = -j\sqrt{3}, \quad a - a^2 = j\sqrt{3}.$$

Если фазу A принять за основную, то систему (8.1) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{B} &= a^2 \dot{A}_1 + a \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{C} &= a \dot{A}_1 + a^2 \dot{A}_2 + \dot{A}_0.\end{aligned}\tag{8.4}$$

Решая совместно системы (8.1) и (8.4), можно получить выражения для определения векторов отдельных последовательностей через вектора несимметричной системы:

$$\begin{aligned}\dot{A}_1 &= \frac{1}{3}(\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C}); \\ \dot{A}_2 &= \frac{1}{3}(\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C}); \\ \dot{A}_0 &= \frac{1}{3}(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}).\end{aligned}\tag{8.5}$$

Из приведенных выражений следует, что при использовании метода симметричных составляющих достаточно вычислить значения симметричных составляющих фазы A , по которым нетрудно определить симметричные составляющие для двух других фаз и полные значения соответствующих фазных величин. Геометрическая сумма векторов прямой и обратной последовательности трех фаз, как и для всяких уравновешенных систем, равна нулю. В противоположность этому система величин нулевой последовательности является неуравновешенной, $\dot{A}_0 + \dot{B}_0 + \dot{C}_0 \neq 0$.

Отсюда следует, что система векторов нулевой последовательности существует лишь тогда, когда несимметричная система векторов тоже является неуравновешенной, то есть $\dot{A} + \dot{B} + \dot{C} \neq 0$.

При всяких несимметричных замыканиях на землю система фазных напряжений всегда содержит нулевую последовательность.

8.1. Особенности несимметричных коротких замыканий

При симметричном трехфазном КЗ напряжение в месте повреждения равнялось нулю (металлическое замыкание) или имело какое-то остаточное значение, но оно оставалось симметричным. При несимметричном КЗ в месте повреждения имеет место асимметрия напряжений, которую можно разложить на симметричные составляющие. В сети при таких несимметричных повреждениях протекают несимметричные токи, которые также разлагаются на симметричные составляющие. Эти симметричные составляющие

токов, протекая в обмотке статора, создают магнитные потоки тех же последовательностей, а последние наводят в статоре соответствующие ЭДС. В силу того, что эти ЭДС являются результатом неизвестных составляющих искомого тока, при анализе несимметричных КЗ учитывают только те ЭДС, которые могут быть определены и не зависят от внешних условий, причем в силу симметричного выполнения статорной обмотки эти ЭДС являются ЭДС только прямой последовательности (то есть E_∞ , E' , E''). Что касается ЭДС, обусловленных реакцией токов отдельных последовательностей (E_2 , E_0), то их учитывают в виде падений напряжений с обратным знаком от протекания тока соответствующей последовательности по сопротивлению этой же последовательности.

Рассмотрим применение метода симметричных составляющих для случая несимметричного КЗ в простейшей схеме, элементы которой для токов прямой, обратной и нулевой последовательности обладают соответственно результирующими сопротивлениями $x_{\Sigma 1}$, $x_{\Sigma 2}$, $x_{\Sigma 0}$ (рис. 8.2).

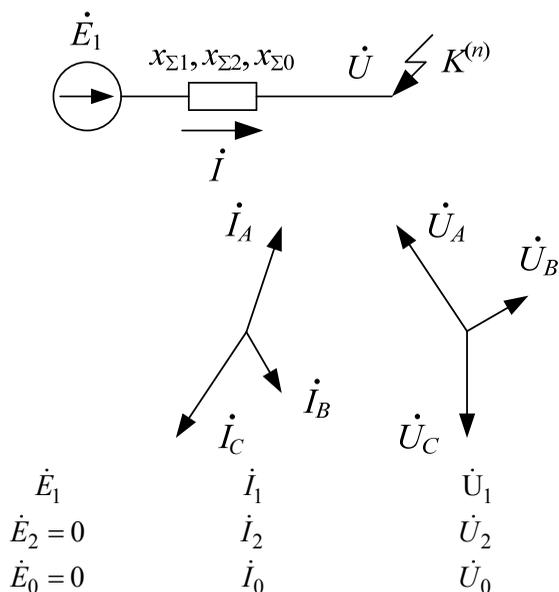


Рис. 8.2

По мере продвижения по цепи от места КЗ к источникам питания напряжение прямой последовательности возрастает от \dot{U}_1 в точке КЗ до \dot{E}_1 , а напряжение обратной и нулевой последовательностей уменьшается от \dot{U}_2 и \dot{U}_0 до нуля.

Учитывая сказанное, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, можно написать следующие выражения для определения симметричных составляющих токов и напряжений в месте КЗ:

$$\begin{aligned}\dot{E}_1 &= \dot{U}_1 + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1}; \\ 0 &= \dot{U}_2 + j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2}; \\ 0 &= \dot{U}_0 + j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0}.\end{aligned}\tag{8.6}$$

Данная система уравнений содержит 6 неизвестных величин; три составляющие напряжения и три составляющие тока.

Три недостающие уравнения для решения этой системы получают из граничных условий, которыми характеризуется тот или иной вид повреждения.

8.2. Появление высших гармоник при несимметричных коротких замыканиях

При несимметричном КЗ по одной или двум фазам генератора, в зависимости от вида КЗ, протекает ток КЗ синхронной частоты. Эти токи создают ответную реакцию статора на ротор $\Delta\Phi_{ad}$. Эта реакция, вызванная несимметричными токами, является пульсирующей во времени и неподвижной в пространстве. Ее можно разложить на две составляющие, одна из которых вращается с той же угловой частотой, что и ротор, в том же направлении, а другая – в противоположном направлении (рис. 8.3).

Составляющая, которая вращается в том же направлении, что и ротор, никак на него не влияет, так как она по отношению к нему неподвижна. Вторая составляющая по отношению к ротору вращается с частотой 2ω и поэтому будет наводить в обмотке возбуждения ЭДС, изменяющуюся с двойной частотой.

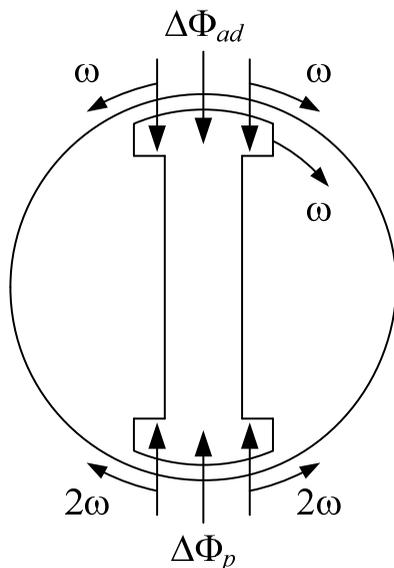


Рис. 8.3

ЭДС в обмотке ротора вызовет ток двойной частоты, который в свою очередь вызовет ответную пульсирующую реакцию ротора на статор двойной частоты $\Delta\Phi_p$. Разложив последнюю на две составляющие, вращающиеся в противоположные стороны с угловой скоростью 2ω относительно ротора, легко убедиться, что составляющая, которая вращается с частотой 2ω против направления вращения ротора, по отношению к статору вращается с частотой ω и создает ответную реакцию на реакцию статора, стремясь ее компенсировать. Другая составляющая по отношению к статору вращается с частотой 3ω и в обмотке статора наводит ЭДС этой частоты. В результате в обмотке статора возникает ток этой частоты (3ω), который создает пульсирующую ответную реакцию статора на ротор тройной частоты. Продолжая подобные рассуждения, можно убедиться, что каждая нечетная гармоника тока статора вызывает четную гармонику тока в обмотке возбуждения, которая в свою очередь вызывает следующую по порядку нечетную гармонику тока статора.

Токи нулевой последовательности, протекая в обмотках фаз статора, сдвинутых в пространстве на 120° и 240° , создают практически

только магнитные потоки рассеяния, которые значительно меньше, чем при токах прямой и обратной последовательностей (рис. 8.4).

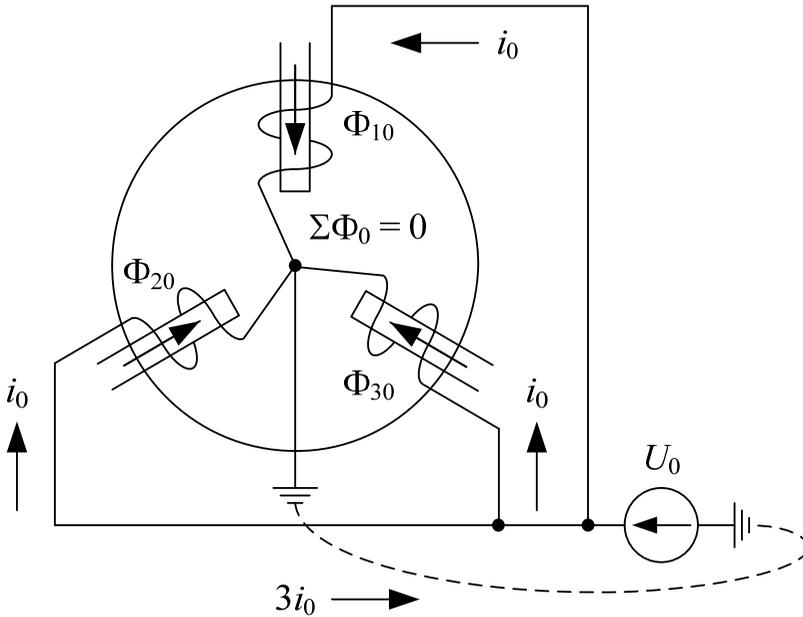


Рис. 8.4

Величина этих магнитных потоков зависит в основном от конструкции и типа генераторной обмотки. Результирующее магнитное поле, созданное токами нулевой последовательности, практически равно 0.

8.3. Сопротивления элементов для токов различных последовательностей

8.3.1. Прямая последовательность

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном симметричном режиме, а также при симметричном трехфазном КЗ, по существу являются сопротивлениями прямой последовательности.

8.3.2. Обратная последовательность

В связи с тем, что при несимметричных КЗ картина магнитного поля синхронной машины резко отличается от картины при симметричном КЗ (появляются высшие гармоники, вызванные наличием тока обратной последовательности), точное определение сопротивления обратной последовательности генераторов затруднено. К тому же данная реактивность, строго говоря, не является параметром машины, так как она зависит от внешних условий (то есть внешней реактивности, вида несимметрии и др.).

В зависимости от конструкции ротора в практических расчетах сопротивление обратной последовательности генераторов определяется через сопротивления прямой последовательности.

Для ТГ и всех генераторов с успокоительными обмотками:

$$x_2 = 1,22x_d''.$$

Для генераторов без успокоительных обмоток, синхронных компенсаторов, малых генераторов:

$$x_2 = 1,45x_d'.$$

В приближенных практических расчетах (расчет по кривым) токов КЗ для турбогенераторов и машин с успокоительными обмотками допускается принимать

$$x_2 = x_d''.$$

Следует заметить, что сопротивление обратной последовательности генераторов не зависит от рассматриваемой стадии переходного процесса.

Сопротивление нагрузки, основу которой составляют асинхронные двигатели, зависит от скольжения s (рис. 8.5).

Из рисунка видно, что значения сопротивления при скольжении 2 практически такое же, как и при $s = 1$, то есть реактивность x_2 двигателя равна его так называемой реактивности короткого замыкания:

$$x_2 = \frac{U_*}{I_{*пуск}} = \frac{1}{I_{*пуск}} = 0,2 \div 0,35. \quad (8.7)$$

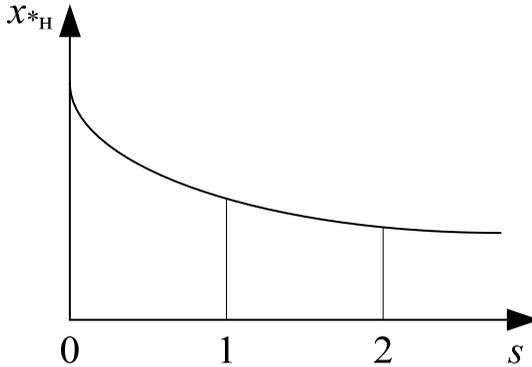


Рис. 8.5

Реактивность обратной последовательности для обобщенной нагрузки в практических расчетах можно принимать $x_2 = 0,35$, считая ее отнесенной к полной мощности нагрузки и среднему номинальному напряжению той ступени, где она подключена.

Для статических элементов (ЛЭП, трансформаторы, реакторы) сопротивления не зависят от порядка чередования фаз. Поэтому для этих элементов сопротивления обратной последовательности равны сопротивлениям прямой последовательности:

$$x_2 = x_1.$$

8.3.3. Нулевая последовательность

Источником тока нулевой последовательности является напряжение этой последовательности в месте повреждения. Ток нулевой последовательности, являясь по существу однофазным током, разветвляется по трем фазам и возвращается к месту повреждения через землю и заземленные опоры и грозозащитные тросы. В силу этого пути циркуляции токов нулевой последовательности резко отличаются от путей протекания токов прямой и обратной последо-

вательностей. Для того чтобы имела место циркуляция токов нулевой последовательности, в схеме со стороны несимметричного КЗ на землю необходимо иметь хотя бы одну заземленную нейтраль, то есть четырехпроводную сеть (рис. 8.6).

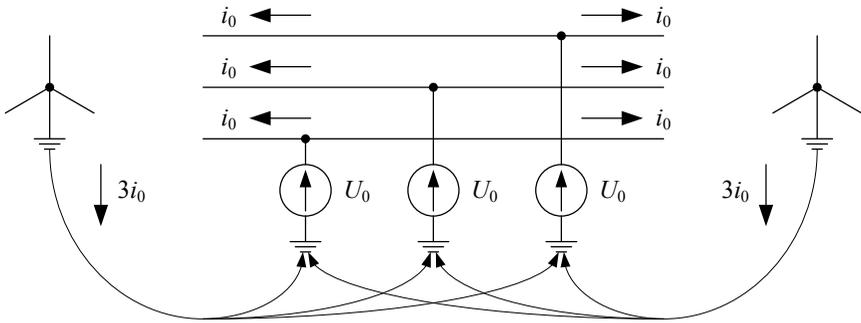


Рис. 8.6

В связи с тем, что результирующее магнитное поле, создаваемое токами нулевой последовательности у генераторов равно нулю, $\sum \Phi_0 = 0$, сопротивление нулевой последовательности генератора будет определяться лишь потоками рассеяния обмотки статора, которые значительно меньше, чем при токах прямой и обратной последовательности. Его величина зависит от типа обмотки. Эта величина задается в паспорте каждого генератора и определяется опытным путем. В практических расчетах пользуются следующим соотношением:

$$x_0 = (0,15 - 0,6)x_d'' \quad (8.8)$$

Реакторы выполняются в однофазном исполнении и поэтому магнитная связь между фазами отсутствует. Сопротивление такого элемента зависит только от частоты тока. Поэтому для данного элемента

$$x_1 = x_2 = x_0.$$

Нагрузка в схему замещения нулевой последовательности не вводится, так как она обычно подключается к сети напряжением 6,

10, 35 кВ, а сети данного класса напряжений работают с изолированной нейтралью, в которой нет пути для протекания тока нулевой последовательности.

Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов зависят от схем соединения обмоток трансформаторов, конструкции их магнитопроводов, а также наличия путей для циркуляции токов нулевой последовательности. Если КЗ имеет место со стороны обмотки, соединенной в треугольник или звезду без заземленной нейтрали, независимо от того, как соединены другие обмотки, сопротивление нулевой последовательности трансформатора $x_0 = \infty$, так как в этом случае вообще исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе (рис. 8.7).

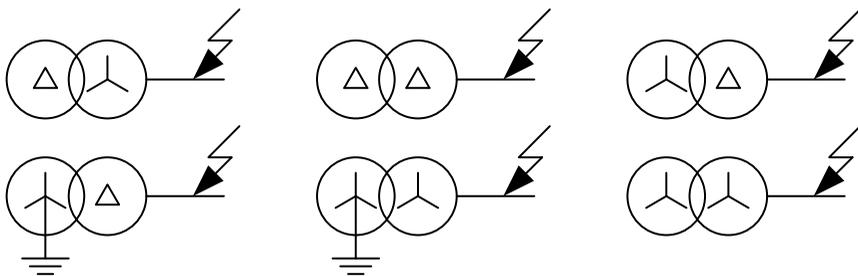


Рис. 8.7

Во всех этих случаях сопротивление нулевой последовательности трансформатора $x_0 = \infty$.

Следовательно, конечная, хотя иногда и очень большая величина сопротивления нулевой последовательности трансформатора, может быть только со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью.

Рассмотрим основные варианты соединения обмоток двухобмоточных трансформаторов (рис. 8.8).

1. Схема соединения обмоток трансформатора Y_0/Δ (см. рис. 8.8).

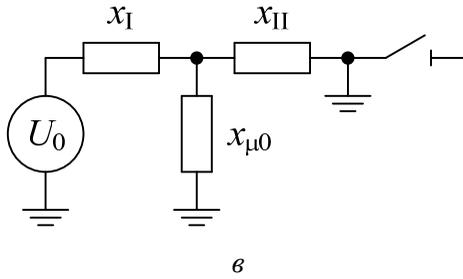
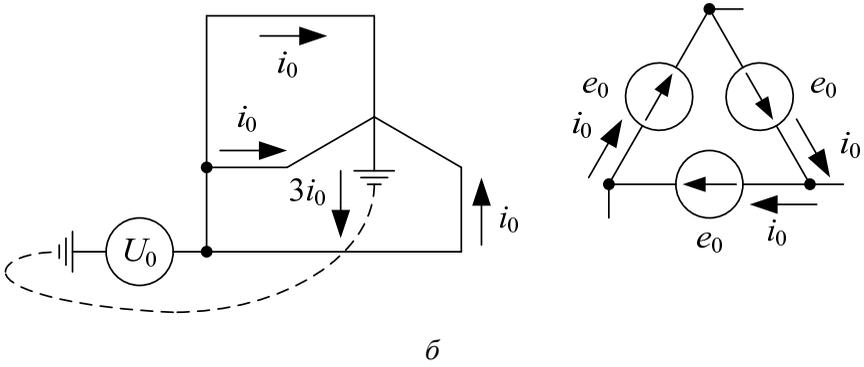
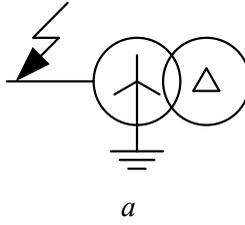


Рис. 8.8

$$\Phi_0 \rightarrow e_0 \rightarrow i_0;$$

$$x_0 = x_I + \frac{x_{II} x_{\mu 0}}{x_{II} + x_{\mu 0}}.$$

2. Схема соединения обмоток трансформатора Y_0/Y (рис. 8.9).

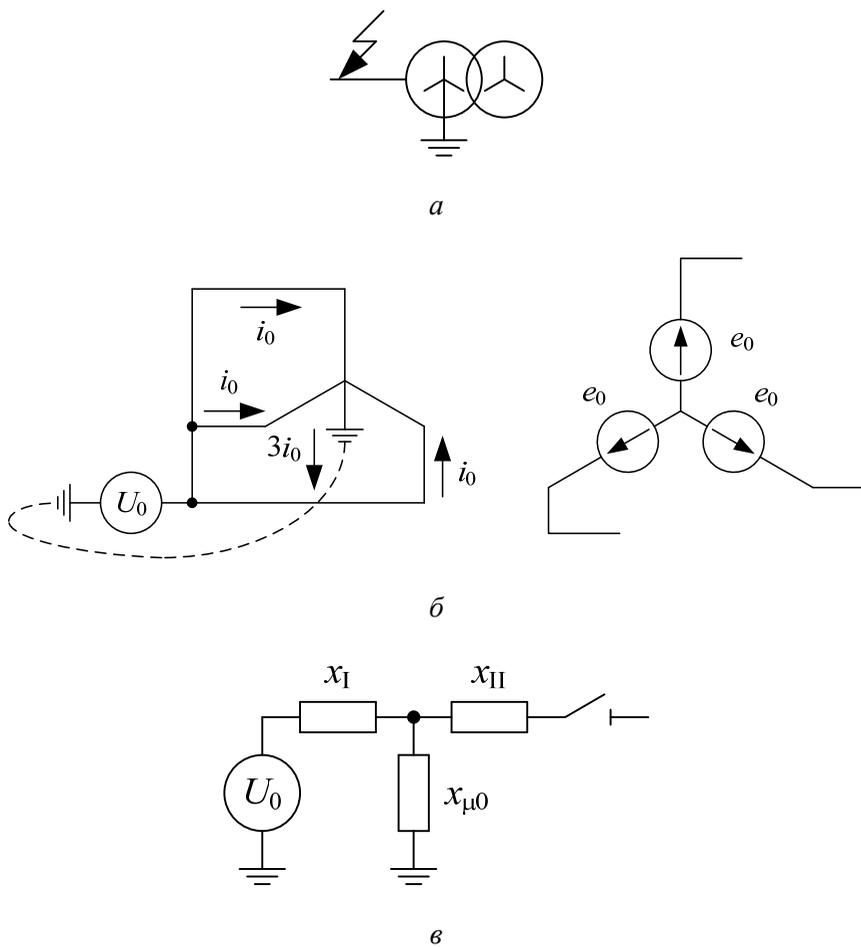


Рис. 8.9

$$\Phi_0 \rightarrow e_0;$$

$$x_0 = x_I + x_{\mu 0}.$$

3. Схема соединения обмоток трансформатора Y_0/Y_0 с внешним элементом, подключенным ко второй обмотке, со схемой соединения Y (рис. 8.10).

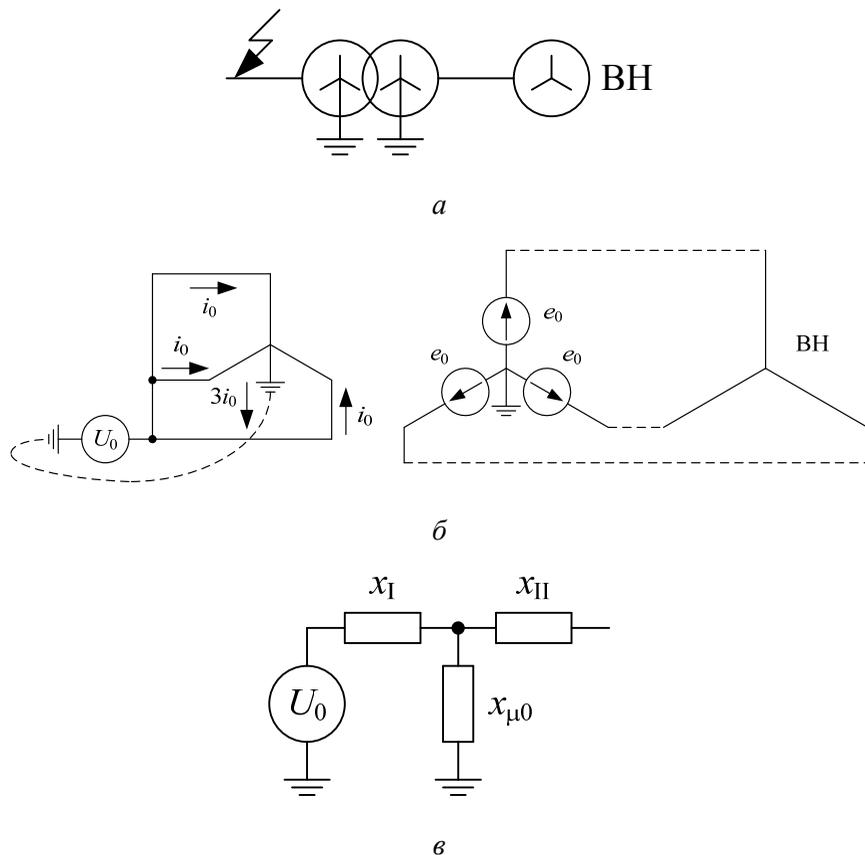


Рис. 8.10

$$\Phi_0 \rightarrow e_0;$$

$$x_0 = x_1 + x_{\mu 0}.$$

4. Схема соединения обмоток трансформатора Y_0/Y_0 с внешним элементом, подключенным ко второй обмотке, со схемой соединения Y_0 (рис. 8.11).

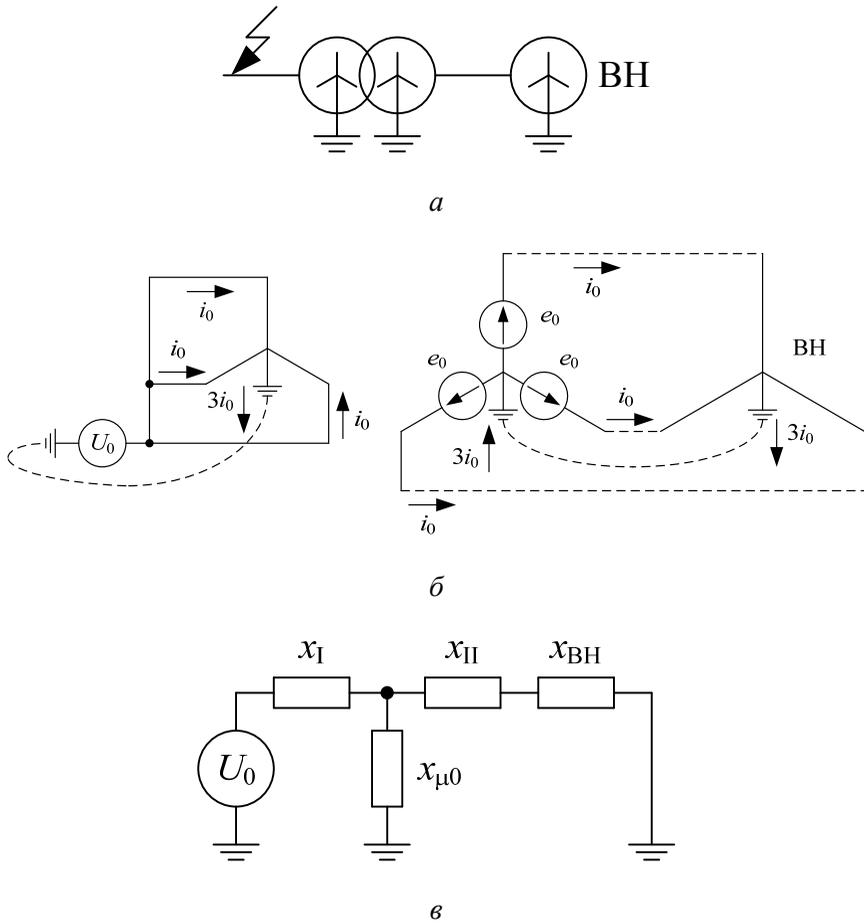


Рис. 8.11

$$x_0 = x_I + \frac{(x_{II} + x_{BH}) \cdot x_{\mu 0}}{x_{II} + x_{BH} + x_{\mu 0}}$$

Во всех выражениях $x_I = x_{II} = 0,5U_k \%$.

Значение величины $x_{\mu 0}$ зависит от конструктивного выполнения трансформатора.

Трехфазная группа из однофазных трансформаторов

Для группы из трех однофазных трансформаторов ток намагничивания нулевой последовательности очень мал, так как в этом случае условия для магнитного потока практически те же, что и при питании трансформатора от источника напряжения прямой (или обратной) последовательности. Поэтому можно считать, с учетом ранее принятых допущений, что $I_{\mu 0} \rightarrow 0$, а $x_{\mu 0} \rightarrow \infty$.

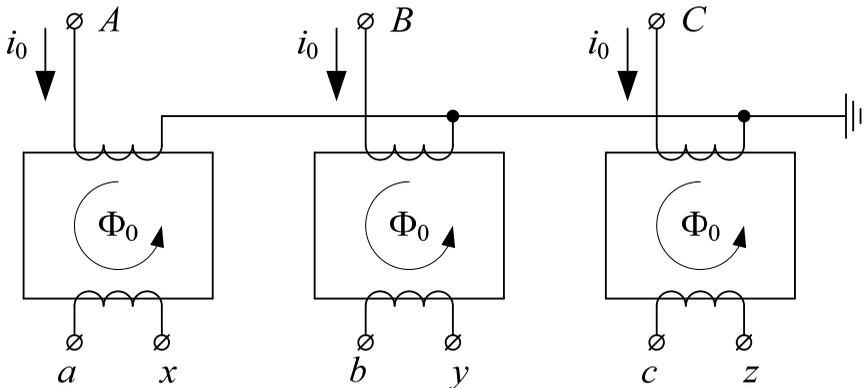


Рис. 8.12

Пятистержневой трехфазный трансформатор

В данном случае имеем ту же ситуацию, что и в предыдущем варианте, так как магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через стержни магнитопровода свободные от обмоток, то есть $I_{\mu 0} \rightarrow 0$, а $x_{\mu 0} \rightarrow \infty$.

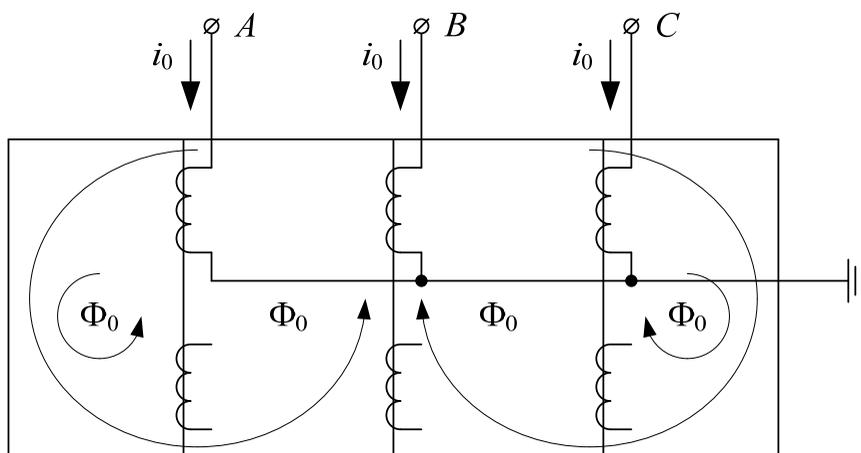


Рис. 8.13

Трехстержневой трехфазный трансформатор

В этих трансформаторах магнитные потоки нулевой последовательности во всех фазах имеют одинаковую величину и направление. Они замыкаются через воздух и бак (корпус) трансформатора. Для проведения магнитного потока по пути со столь значительным магнитным сопротивлением необходим достаточно большой ток намагничивания. Следовательно, у таких трансформаторов сопротивление $x_{\mu 0}$ значительно меньше, чем $x_{\mu 1}$. В зависимости от конструкции трансформатора для трехстержневых трансформаторов принимают $x_{\mu 0} = (0,3 \div 1)$. Эта величина выражена в относительных единицах при номинальной мощности трансформатора.

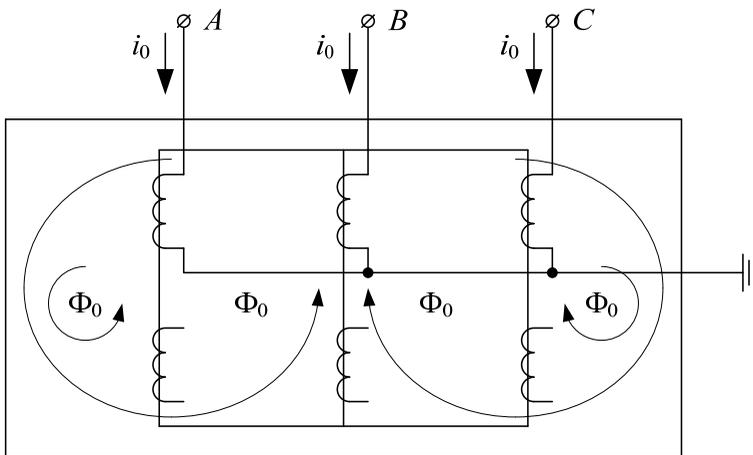


Рис. 8.14

С учетом конструкции трансформатора, в зависимости от схемы соединения обмоток, сопротивление нулевой последовательности будет определяться следующим образом (рис. 8.15).

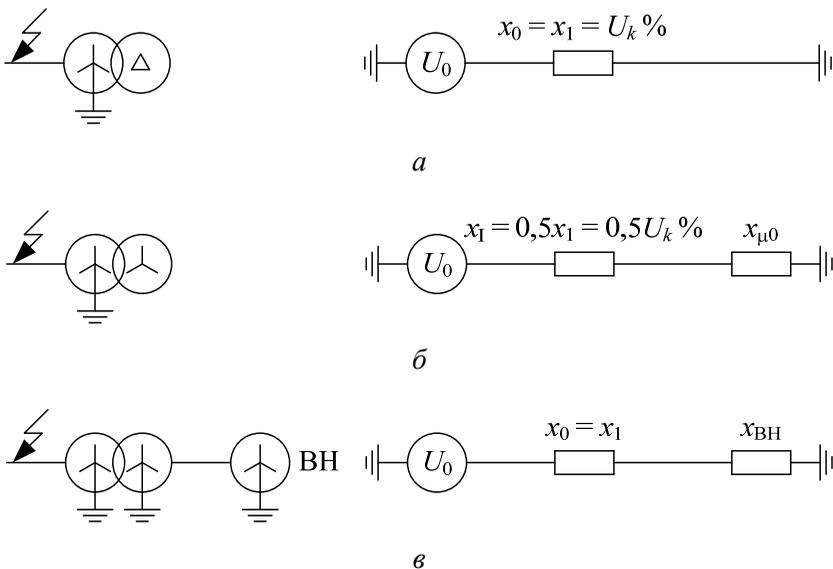


Рис. 8.15

x_1 – сопротивление прямой последовательности трансформатора.

Рассмотрим характерные схемы соединения обмоток трехобмоточных трансформаторов (рис. 8.16–8.19).

1. Схема соединения обмоток трансформатора $Y_0/\Delta/\Delta$ (рис. 8.16).

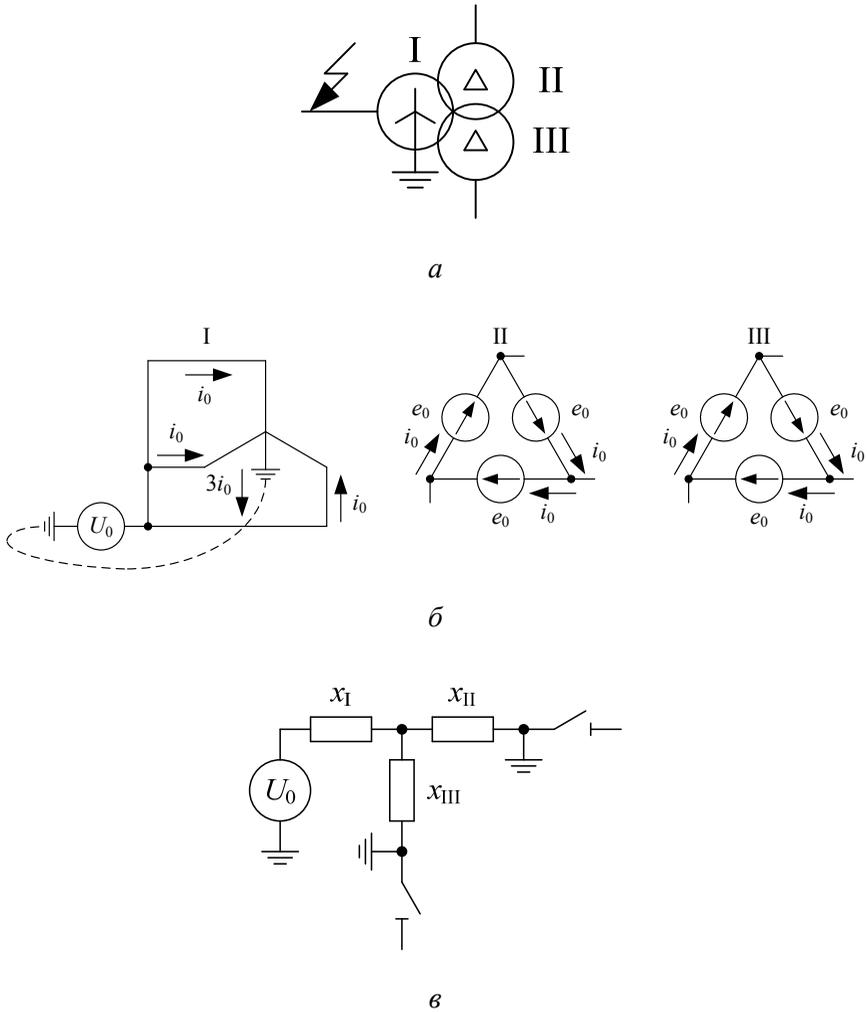


Рис. 8.16

$$x_0 = x_I + \frac{x_{II}x_{III}}{x_{II} + x_{III}}.$$

2. Схема соединения обмоток трансформатора $Y_0/Y/\Delta$ (рис. 8.17).

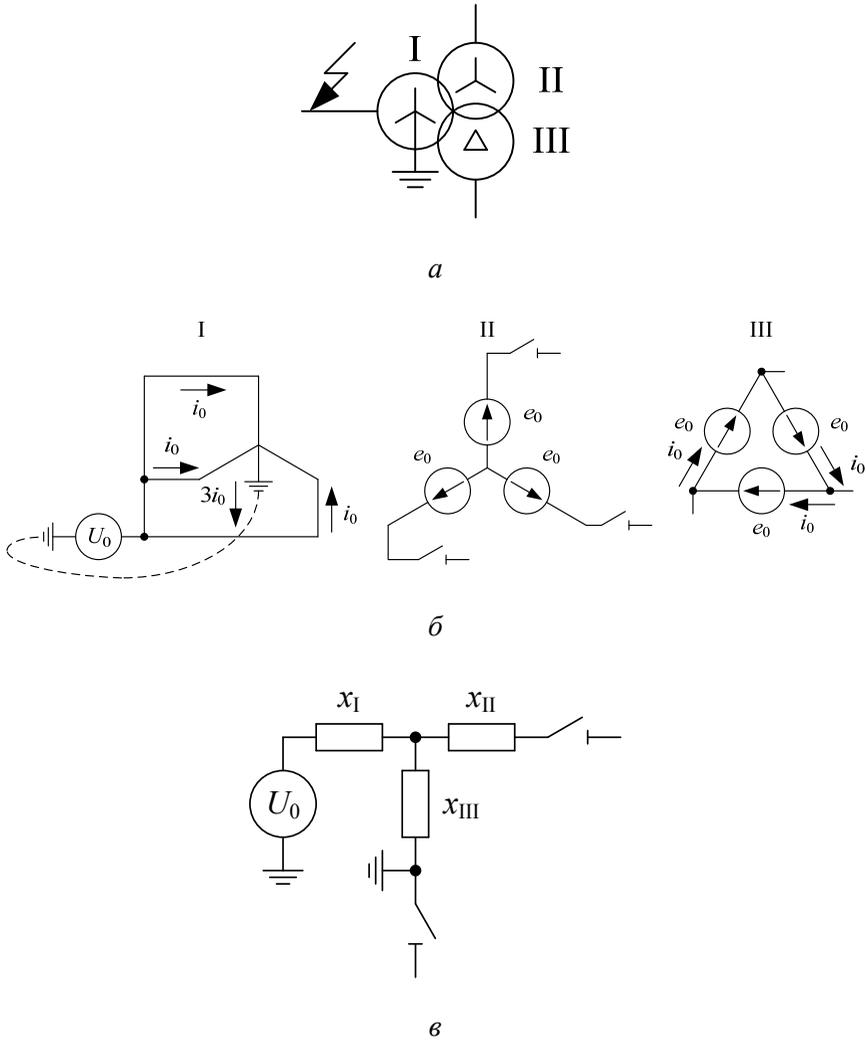


Рис. 8.17

$$x_0 = x_I + x_{III}.$$

3. Схема соединения обмоток трансформатора $Y_0/Y_0/\Delta$ (рис. 8.18).

Если у трансформатора (рис. 8.18, а) ко второй обмотке не подключен внешний элемент с заземленной нейтралью, то будет иметь место такое же значение сопротивления нулевой последовательности, как и в предыдущем случае, то есть $x_0 = x_I + x_{III}$.

Если же у трансформатора ко второй обмотке подключен внешний элемент, соединенный по схеме Y_0 (рис. 8.18, в), то в этом случае значение сопротивления нулевой последовательности будет

$$x_0 = x_I + \frac{(x_{II} + x_{ВН})x_{III}}{x_{II} + x_{ВН} + x_{III}}.$$

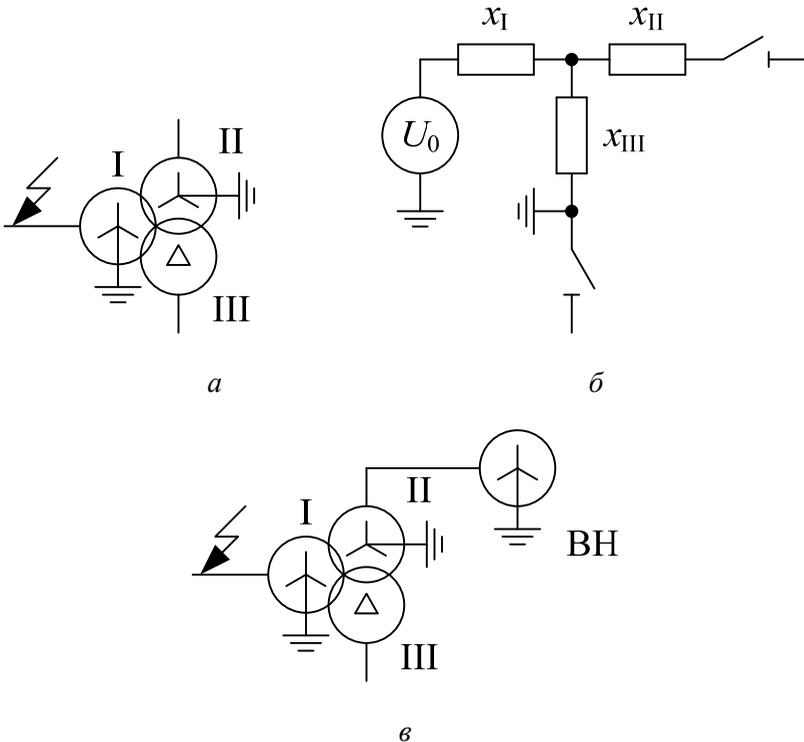


Рис. 8.18

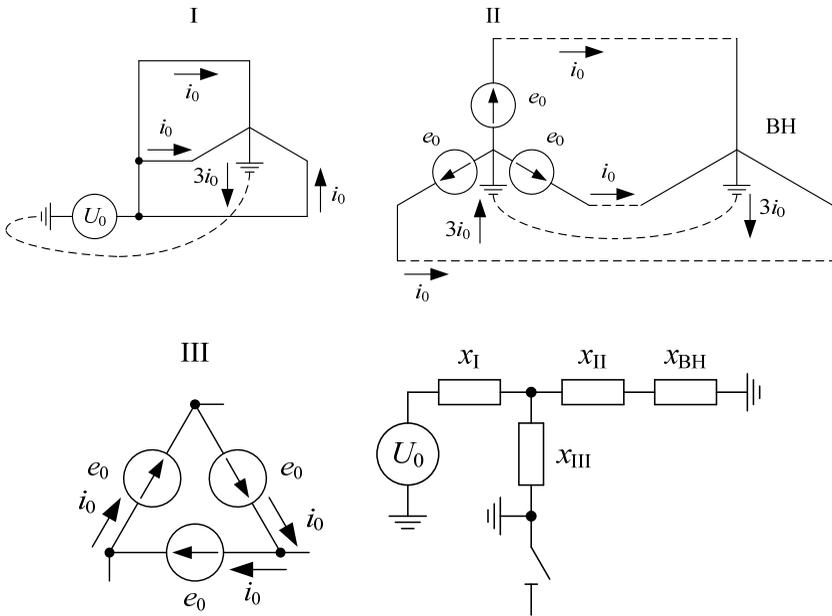


Рис. 8.19

У трехобмоточных трансформаторов всегда одна из обмоток соединена по схеме треугольника. Сопротивление $x_{\mu 0}$ в схеме замещения этих трансформаторов всегда включено параллельно сопротивлению этой обмотки. Поскольку оно велико, им можно пренебречь, то есть считать $x_{\mu 0} = \infty$.

Подводя итог, можно отметить, что в тех случаях, когда ток нулевой последовательности протекает по обеим обмоткам двухобмоточного трансформатора, в схему замещения нулевой последовательности такой трансформатор необходимо вводить одним сопротивлением, величина его принимается равной сопротивлению прямой последовательности трансформатора. Трансформатор в схеме замещения нулевой последовательности никогда не учитывается сопротивлением только одной обмотки. Схемы замещения для токов нулевой последовательности автотрансформаторов, в зависимости от схем соединения обмоток, имеют тот же вид, что и схемы трансформаторов. Сопротивления определяются аналогично.

Сопротивление, через которое могут быть заземлены нейтрали трансформаторов, генераторов, вводится в схему замещения нулевой последовательности утроенной величиной, последовательно с сопротивлением той обмотки, в нейтраль которой оно подключено. Это обусловлено тем, что схему нулевой последовательности составляют однолинейной, а через указанное сопротивление протекает утроенное значение тока нулевой последовательности (рис. 8.20).

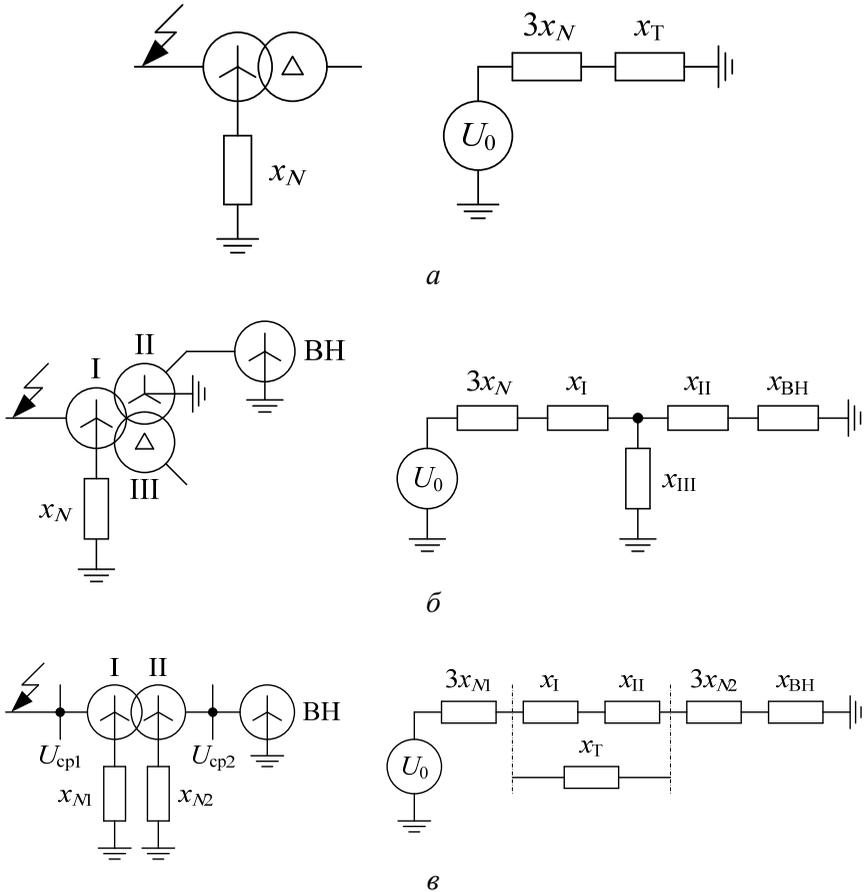


Рис. 8.20

При приведении сопротивлений заземления нейтралей к базисным условиям следует помнить, что необходимо брать средние номинальные напряжения тех ступеней, на которые они включены:

$$x_{*3} = 3x_N \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ср н}}^2}; \quad (8.9)$$

для $x_{N1} \rightarrow U_{\text{ср н1}}$,

для $x_{N2} \rightarrow U_{\text{ср н2}}$.

Воздушные линии электропередач

Ток нулевой последовательности, протекающий по фазам воздушных линий, возвращается к месту повреждения через землю и другие заземленные цепи (металлические опоры, грозозащитные тросы) (рис. 8.21).

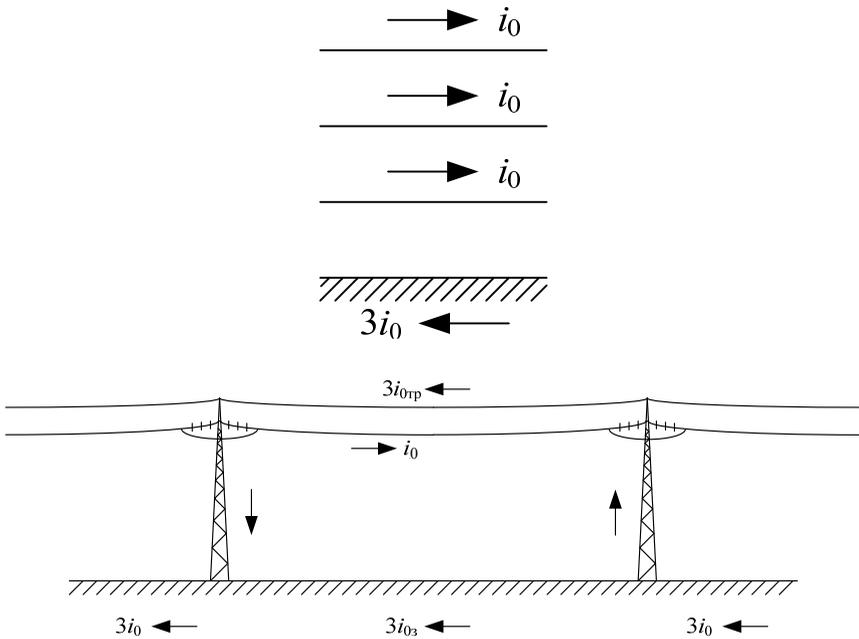


Рис. 8.21

Главная трудность определения сопротивлений нулевой последовательности воздушной линии связана с учетом распределения тока в земле.

В практических расчетах в качестве средних соотношений между индуктивными сопротивлениями нулевой и прямой последовательностей принимают следующие значения.

1. Одноцепная ЛЭП без троса, $x_0 = 3,5x_1$.
2. Одноцепная ЛЭП со стальным тросом, $x_0 = 3x_1$.
3. Одноцепная ЛЭП с хорошо проводящим тросом, $x_0 = 2x_1$.
4. Двухцепная ЛЭП без троса, $x_0 = 5,5x_1$.
5. Двухцепная ЛЭП со стальным тросом, $x_0 = 4,7x_1$.
6. Двухцепная ЛЭП с хорошо проводящим тросом, $x_0 = 3x_1$.

Для двухцепных ЛЭП x_1 – эквивалентное сопротивление прямой последовательности двух цепей.

Кабельные линии

Ток нулевой последовательности, протекая по жилам кабеля, возвращается к месту повреждения по земле, а также по бронированной оболочке, которая заземлена по его концам и в промежуточных точках (муфты). На распределение тока между оболочкой и землей существенно влияет не только собственное сопротивление ее заземлений, но и характер прокладки кабеля (траншея, блоки). Все это и целый ряд других факторов затрудняет достоверный расчет величины сопротивления нулевой последовательности Z_0 . Единственный путь получения надежных данных о Z_0 кабеля состоит в проведении соответствующих замеров в реальных условиях. В практических расчетах пользуются следующими соотношениями:

$$x_0 = (3,5 \div 4,6)x_1, R_0 = 10R_1. \quad (8.10)$$

8.4. Составление схем замещения для токов различных последовательностей

Для анализа и расчета несимметричных КЗ в общем случае необходимо составлять схемы замещения всех последовательностей (прямой, обратной и нулевой). По этим схемам находят результирующие сопротивления отдельных последовательностей рассматриваемой системы относительно места повреждения. Из схемы прямой последовательности находят также результирующую ЭДС относительно точки КЗ.

8.4.1. Схема замещения прямой последовательности

Схема прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени, для которого осуществляют расчет, в нее вводят генераторы и нагрузки соответствующими сопротивлениями и ЭДС.

8.4.2. Схема замещения обратной последовательности

При составлении схемы замещения обратной последовательности следует помнить, что токи обратной последовательности протекают по тем же элементам, что и токи прямой последовательности. Следовательно, схема замещения обратной последовательности по структуре будет полностью повторять схему прямой последовательности. Различие будет в следующем:

1. Сопротивления генераторов и нагрузок обратной последовательности практически постоянны и не зависят от вида КЗ, а также от рассматриваемой стадии переходного процесса.

2. ЭДС всех генерирующих источников в схеме обратной последовательности принимают равными нулю.

3. Источником тока обратной последовательности является напряжение этой последовательности, включенное между местом повреждения и точками нулевого потенциала генерирующих источников (так как $E_2 = 0$).

При расчете по расчетным кривым, в силу принятых допущений, можно считать, что сопротивление схемы обратной последовательности равно сопротивлению схемы прямой последовательности, $x_{\Sigma 2} \cong x_{\Sigma 1}$.

8.4.3. Схема замещения нулевой последовательности

В силу того, что токи нулевой последовательности являются однофазными и распределяются по трем фазам трехфазной сети, для их протекания необходимо иметь четырехпроводную сеть или заземленные нейтраль обмоток трансформаторов, генераторов со стороны точки КЗ. С учетом этой особенности схема нулевой последовательности резко отличается от схем прямой и обратной последовательностей. Ее всегда начинают составлять с места повреждения, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к этому месту приложено напряжение нулевой последовательности. Для циркуляции токов нулевой последовательности необходима по меньшей мере одна заземленная нейтраль, электрически связанная с местом повреждения. В схему замещения нулевой последовательности вводят те элементы, по которым протекает ток нулевой последовательности. Значения сопротивлений элементов схемы определяют в соответствии с ранее полученными зависимостями.

Рассмотрим несколько примеров составления схем замещения нулевой последовательности.

Пример № 1

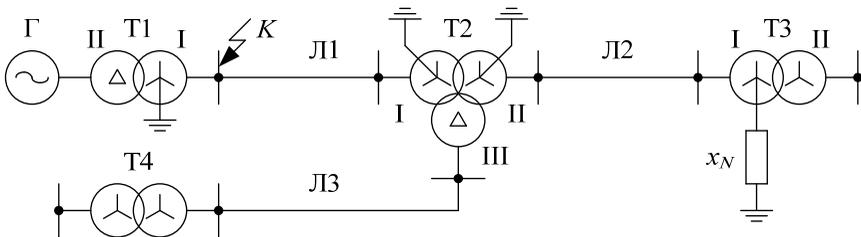


Рис. 8.22

Для выявления путей протекания тока нулевой последовательности изобразим исходную схему в трехфазном исполнении и, начиная от места несимметрии, покажем стрелками эти пути (рис. 8.23).

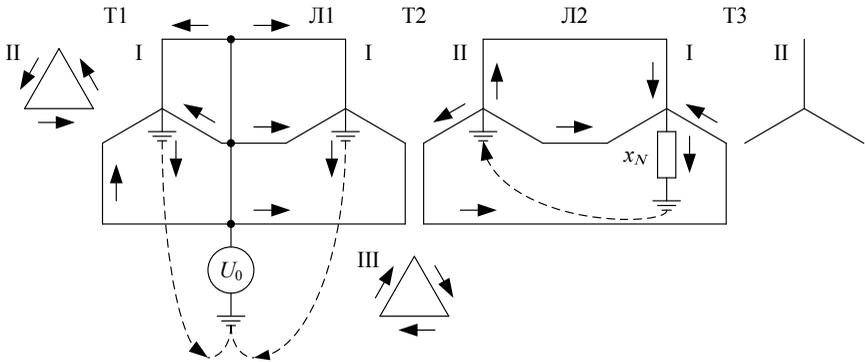


Рис. 8.23

С учетом путей циркуляции токов нулевой последовательности составляем схему замещения (рис. 8.24).

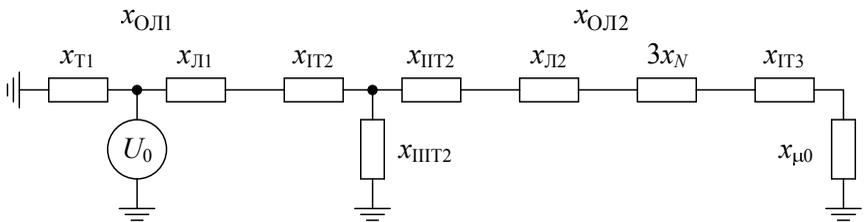


Рис. 8.24

Преобразуя схему:

$$x_1 = x_{\mu 0} + 3x_N + x_{ОЛ2} + x_{ШТ2} + x_{Т3};$$

$$x_2 = x_{ОЛ1} + x_{Т2};$$

$$x_3 = x_1 // x_{ШТ2}, \quad x_4 = x_3 + x_2, \quad x_5 = x_{Т1} // x_4,$$

в итоге получаем (рис. 8.25).

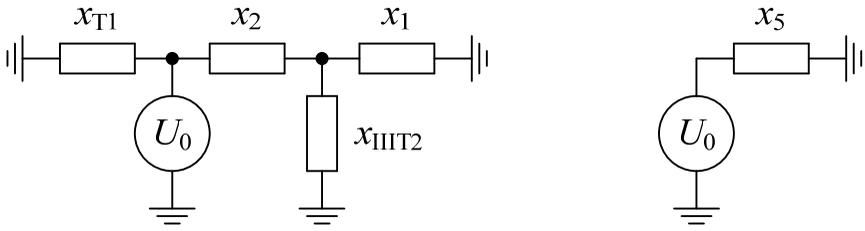


Рис. 8.25

Пример № 2

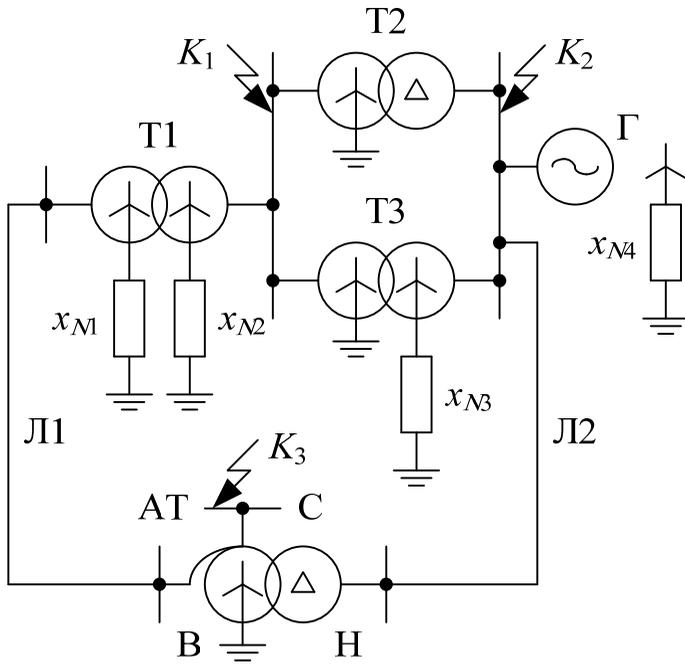


Рис. 8.26

Схемы замещения нулевой последовательности:

– при КЗ в точке K_1 (рис. 8.27);

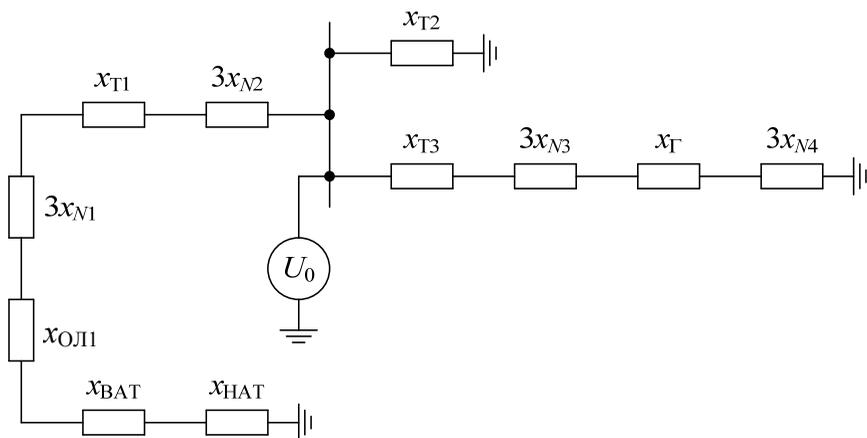


Рис. 8.27

– при КЗ в точке K_2 (рис. 8.28);

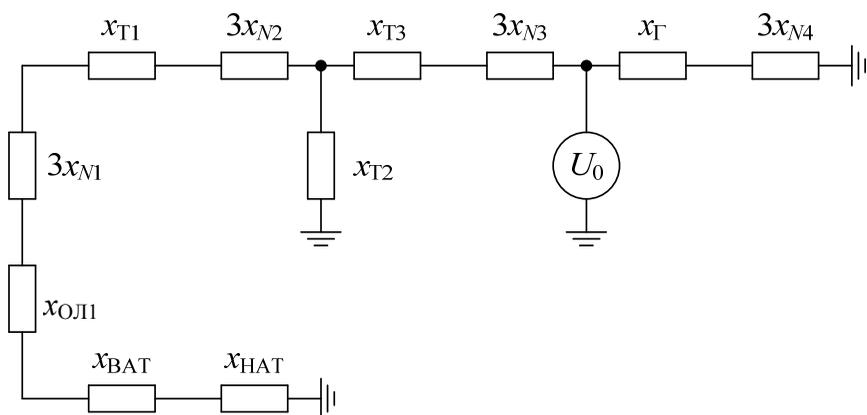


Рис. 8.28

– при КЗ в точке K_3 (рис. 8.29).

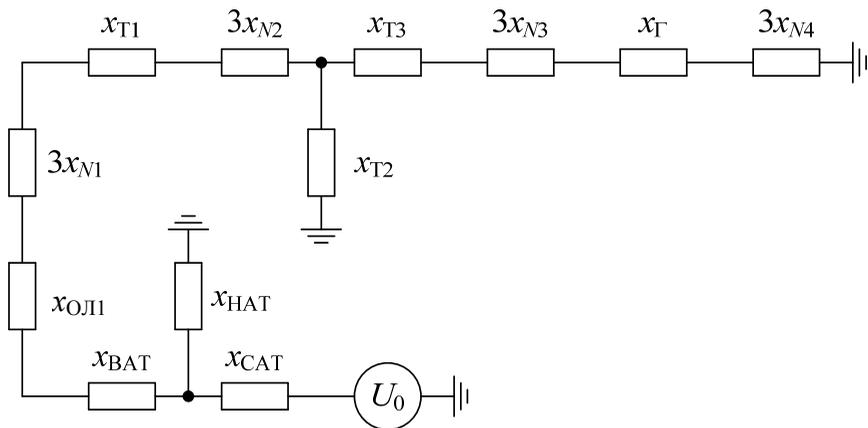


Рис. 8.29

9. ОДНОКРАТНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ. ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Рассмотрим три вида несимметричных КЗ: однофазное, двухфазное и двухфазное КЗ на землю. Симметричные составляющие токов и напряжений определяются на основе уравнений по второму закону Кирхгофа для каждой последовательности с учетом граничных условий в месте повреждения при каждом виде КЗ. Будем считать, что в особых условиях в месте повреждения находится фаза A , индекс которой в записях будем опускать. Повреждение в рассматриваемой точке будем считать металлическим.

Симметричные составляющие токов и напряжений в месте несимметричных КЗ, как показано в разделе 8.1, связаны между собой следующими выражениями по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1}; \quad (9.1)$$

$$0 = \dot{U}_2 + j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2}; \quad (9.2)$$

$$0 = \dot{U}_0 + j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0}. \quad (9.3)$$

Чтобы решить систему этих уравнений, необходимо составить еще три уравнения, вытекающие из граничных условий соответствующего вида несимметричного КЗ. Для внесения определенности в граничные условия предполагают, что КЗ происходит на ответвлении, сопротивление проводников которого равно нулю.

9.1. Двухфазное короткое замыкание

Двухфазное КЗ представлено на рис. 9.1.

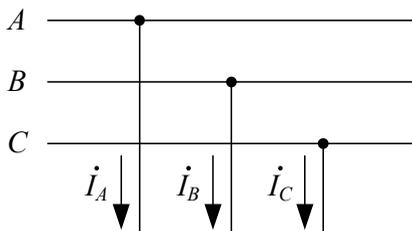


Рис. 9.1

Граничные условия для данного вида КЗ:

$$\dot{I}_A = 0; \quad (9.4)$$

$$\dot{I}_B = -\dot{I}_C; \quad (9.5)$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_C. \quad (9.6)$$

Очевидно:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 0. \quad (9.7)$$

Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(a - a^2)\dot{I}_B; \quad (9.8)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(a^2 - a)\dot{I}_B; \quad (9.9)$$

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = 0. \quad (9.10)$$

В силу того, что система уравновешенная, то есть нет замыкания на землю, и что $\dot{I}_0 = 0$, с учетом (9.8) и (9.9) получим:

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2. \quad (9.11)$$

Напряжения прямой и обратной последовательностей:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) = \frac{1}{3}[\dot{U}_A + (a + a^2)\dot{U}_B], \quad (9.12)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) = \frac{1}{3}[\dot{U}_A + (a^2 + a)\dot{U}_B], \quad (9.13)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2. \quad (9.14)$$

Так как $\dot{I}_0 = 0$, то из (9.3) следует, что $\dot{U}_0 = 0$.

Вычтем из (9.1) (9.2) и с учетом (9.11) и (9.14) получим:

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1} - j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = j\dot{I}_1 (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}). \quad (9.15)$$

Отсюда

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2})}. \quad (9.16)$$

Действующее значение тока прямой последовательности при двухфазном КЗ:

$$I_1^{(2)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}}. \quad (9.17)$$

Запишем, чему будут равны токи поврежденных фаз:

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B_1} + \dot{I}_{B_2} + \dot{I}_{B_0} = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 = (a^2 - a) \dot{I}_1 = -j\sqrt{3} \dot{I}_1; \quad (9.18)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C_1} + \dot{I}_{C_2} + \dot{I}_{C_0} = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 = (a - a^2) \dot{I}_1 = j\sqrt{3} \dot{I}_1; \quad (9.19)$$

$$I_B = -I_C = \sqrt{3} I_1^{(2)}. \quad (9.20)$$

Определим, чему будут равны напряжения фаз в месте двухфазного КЗ:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 2\dot{U}_1; \quad (9.21)$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B_1} + \dot{U}_{B_2} + \dot{U}_{B_0} = a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 = (a^2 + a) \dot{U}_1 = -\dot{U}_1; \quad (9.22)$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C_1} + \dot{U}_{C_2} + \dot{U}_{C_0} = a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 = (a^2 + a) \dot{U}_1 = -\dot{U}_1; \quad (9.23)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = -j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = j\dot{I}_1 x_{\Sigma 2}; \quad (9.24)$$

$$U_1^{(2)} = I_1^{(2)} x_{\Sigma 2}. \quad (9.25)$$

На основании полученных соотношений построим векторные диаграммы напряжений и токов в месте двухфазного КЗ (рис. 9.2).

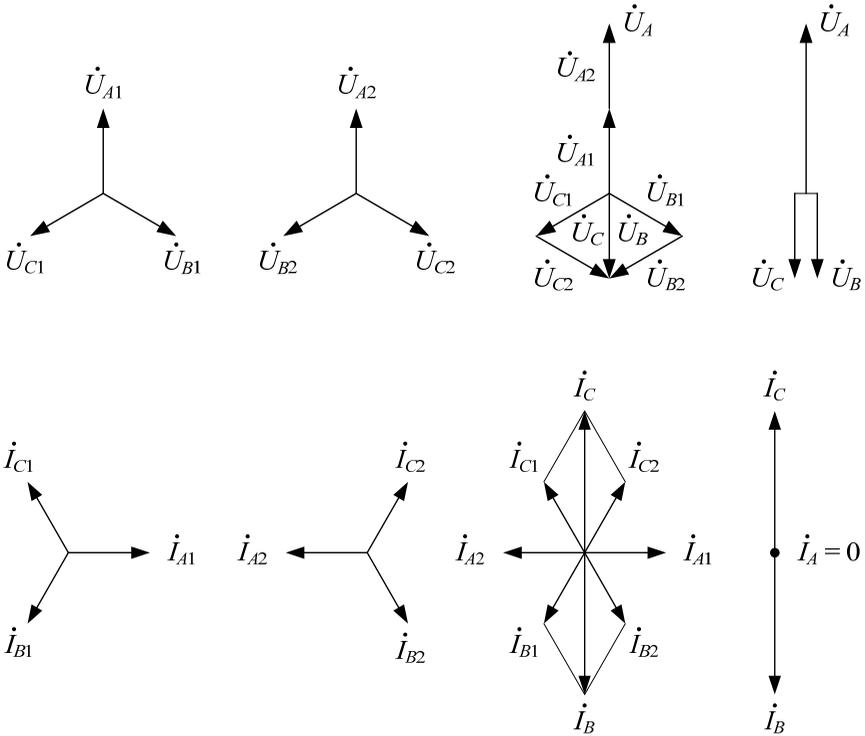


Рис. 9.2

9.2. Однофазное короткое замыкание

Однофазное КЗ представлено на рис. 9.3.

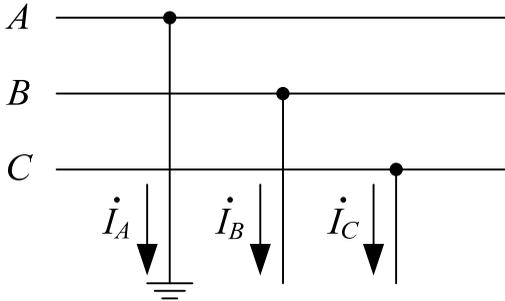


Рис. 9.3

Граничные условия для данного вида КЗ:

$$\dot{I}_B = 0; \quad (9.26)$$

$$\dot{I}_C = 0; \quad (9.27)$$

$$\dot{U}_A = 0. \quad (9.28)$$

Для особой фазы A запишем:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0; \quad (9.29)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A; \quad (9.30)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A; \quad (9.31)$$

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A; \quad (9.32)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_0. \quad (9.33)$$

Просуммируем уравнения (9.1)–(9.3) с учетом (9.29) и (9.33), получим:

$$\begin{aligned}\dot{E}_1 &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1} + j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} + j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0} = \\ &= j\dot{I}_1 (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}),\end{aligned}\quad (9.34)$$

откуда

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}.\quad (9.35)$$

Действующее значение тока прямой последовательности при однофазном КЗ

$$I_1^{(1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}.\quad (9.36)$$

Из уравнения (9.29) следует:

$$\dot{U}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{U}_0).\quad (9.37)$$

Из уравнений (9.2) и (9.3):

$$\dot{U}_2 = -j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = -j\dot{I}_1 x_{\Sigma 2};\quad (9.38)$$

$$\dot{U}_0 = -j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0} = -j\dot{I}_1 x_{\Sigma 0};\quad (9.39)$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= j\dot{I}_1 x_{\Sigma 2} + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 0} = j\dot{I}_1 (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}); \\ U_1^{(1)} &= I_1^{(1)} (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}).\end{aligned}\quad (9.40)$$

Запишем, чему будут равны ток поврежденной фазы и напряжения здоровых фаз:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 3\dot{I}_1.\quad (9.41)$$

Ток при однофазном КЗ в три раза превышает ток прямой последовательности при данном виде КЗ:

$$I_A = 3I_1^{(1)}. \quad (9.42)$$

Этот же ток поступает в землю в месте однофазного КЗ:

$$I_3 = 3I_0^{(1)} = 3I_1^{(1)}. \quad (9.43)$$

Напряжения неповрежденных фаз:

$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{U}_{B_1} + \dot{U}_{B_2} + \dot{U}_{B_0} = a^2\dot{U}_1 + a\dot{U}_2 + \dot{U}_0 = \\ &= a^2 j\dot{I}_1 (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) + a(-j\dot{I}_1 x_{\Sigma 2}) - j\dot{I}_1 x_{\Sigma 0} = \\ &= j\dot{I}_1 \left[(a^2 - a)x_{\Sigma 2} + (a^2 - 1)x_{\Sigma 0} \right]; \end{aligned} \quad (9.44)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_C &= \dot{U}_{C_1} + \dot{U}_{C_2} + \dot{U}_{C_0} = a\dot{U}_1 + a^2\dot{U}_2 + \dot{U}_0 = \\ &= aj\dot{I}_1 (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) - ja^2\dot{I}_1 x_{\Sigma 2} - j\dot{I}_1 x_{\Sigma 0} = \\ &= j\dot{I}_1 \left[(a - a^2)x_{\Sigma 2} + (a - 1)x_{\Sigma 0} \right]. \end{aligned} \quad (9.45)$$

На основании полученных соотношений построим векторные диаграммы токов и напряжений в месте однофазного КЗ (рис. 9.4 и 9.5).

Угол θ изменяется от 60° до 180° и зависит от величины $x_{\Sigma 0}$:

при

$$x_{\Sigma 0} \rightarrow 0, \quad \theta \rightarrow 180^\circ;$$

при

$$x_{\Sigma 0} \rightarrow \infty, \quad \theta \rightarrow 60^\circ;$$

если

$$x_{\Sigma 0} = x_{\Sigma 2}, \quad \text{то } \theta = 120^\circ.$$

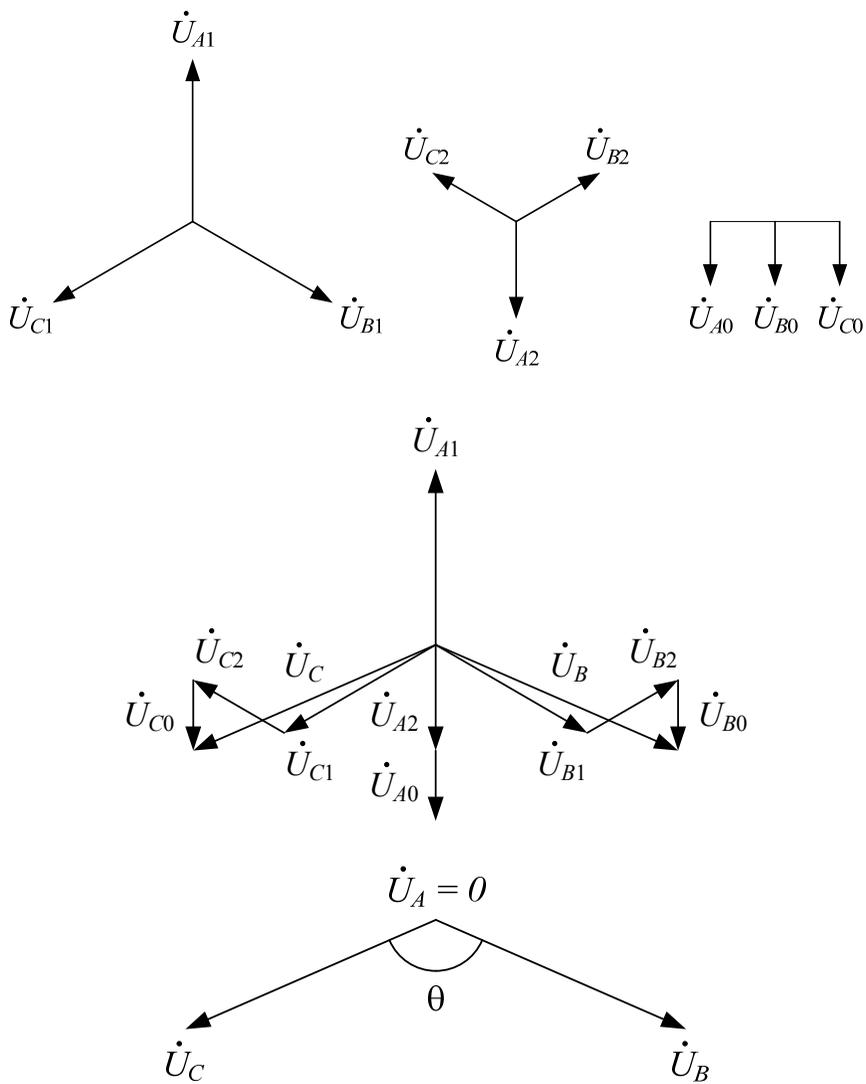


Рис. 9.4

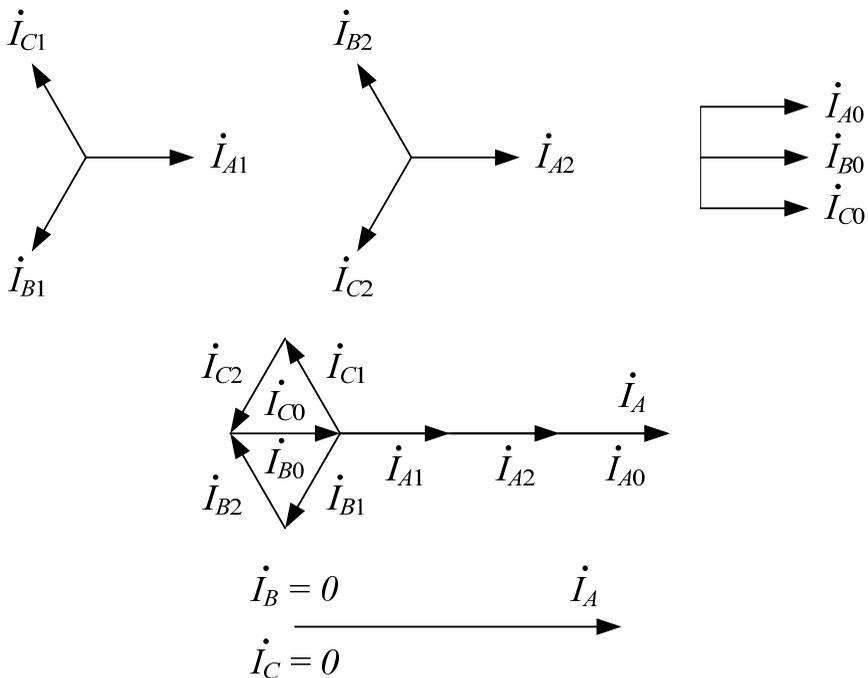


Рис. 9.5

9.3. Двухфазное короткое замыкание на землю

Двухфазное КЗ на землю (рис. 9.6).

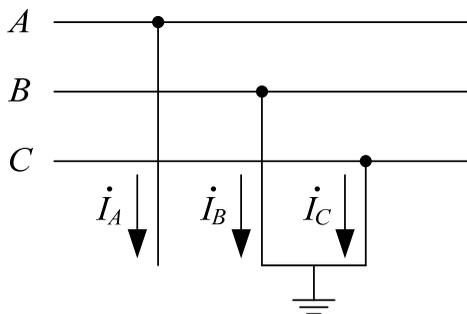


Рис. 9.6

Граничные условия для данного вида КЗ:

$$\dot{U}_B = 0; \quad (9.46)$$

$$\dot{U}_C = 0; \quad (9.47)$$

$$\dot{I}_A = 0. \quad (9.48)$$

Для особой фазы запишем:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0; \quad (9.49)$$

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) = \frac{1}{3}\dot{U}_A; \quad (9.50)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) = \frac{1}{3}\dot{U}_A; \quad (9.51)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{1}{3}\dot{U}_A; \quad (9.52)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_0; \quad (9.53)$$

$$\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 3\dot{U}_1. \quad (9.54)$$

Выразим из (9.2) \dot{U}_2 , а из (9.3) \dot{U}_0 , и приравняем их между собой:

$$j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = j\dot{I}_0 x_{\Sigma 0}. \quad (9.55)$$

Из (9.55) можно записать:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_2 \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0}}; \quad (9.56)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_0 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2}}. \quad (9.57)$$

Пользуясь выражением (9.49) и (9.56), получим:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_2 \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0}} = 0.$$

Откуда

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}. \quad (9.58)$$

Если воспользоваться выражениями (9.49) и (9.57), то

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_0 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2}} + \dot{I}_0 = 0.$$

Откуда

$$\dot{I}_0 = -\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}. \quad (9.59)$$

Вычтем из (9.1) уравнение (9.2) с учетом (9.53) и (9.58), получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{U}_1 - \dot{U}_2 + j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1} - j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = \\ &= j\dot{I}_1 x_{\Sigma 1} + j\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} = j\dot{I}_1 \left(x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right). \end{aligned} \quad (9.60)$$

Отсюда можно записать

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{j \left(x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right)}. \quad (9.61)$$

Действующее значение тока прямой последовательности при двухфазном КЗ на землю:

$$I_1^{(1,1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}}. \quad (9.62)$$

Комплексное и действующее значения напряжения прямой последовательности при двухфазном КЗ на землю:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_0 = -j\dot{I}_2 x_{\Sigma 2} = j\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}. \quad (9.63)$$

$$U_1^{(1,1)} = I_1^{(1,1)} \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}. \quad (9.64)$$

Запишем, чему будут равны токи поврежденных фаз:

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= \dot{I}_{B_1} + \dot{I}_{B_2} + \dot{I}_{B_0} = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = \\ &= a^2 \dot{I}_1 + a \left(-\dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right) - \dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} = \\ &= \dot{I}_1 \left(a^2 - a \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} - \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right). \end{aligned} \quad (9.65)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= \dot{I}_{C_1} + \dot{I}_{C_2} + \dot{I}_{C_0} = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = \\ &= a \dot{I}_1 - a^2 \dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} - \dot{I}_1 \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} = \\ &= \dot{I}_1 \left(a - a^2 \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} - \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right). \end{aligned} \quad (9.66)$$

Действующее значение тока поврежденных фаз будет определяться

$$I_B = I_C = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{(x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2})^2}} I_1^{(1,1)}. \quad (9.67)$$

Построим векторные диаграммы напряжений и токов в месте двухфазного КЗ на землю (рис. 9.7 и 9.8).

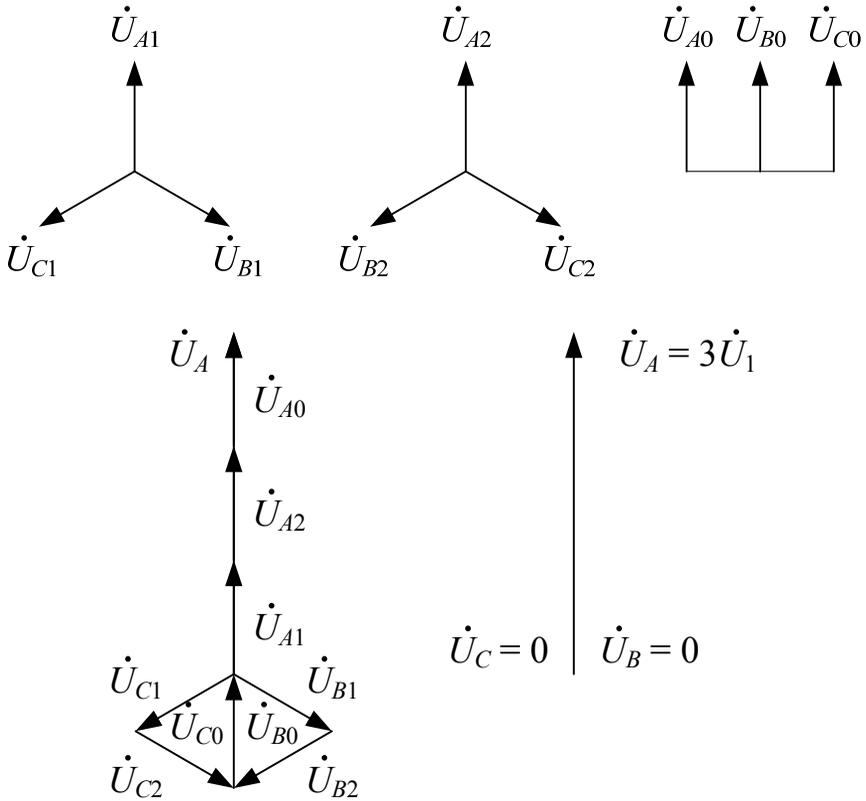


Рис. 9.7

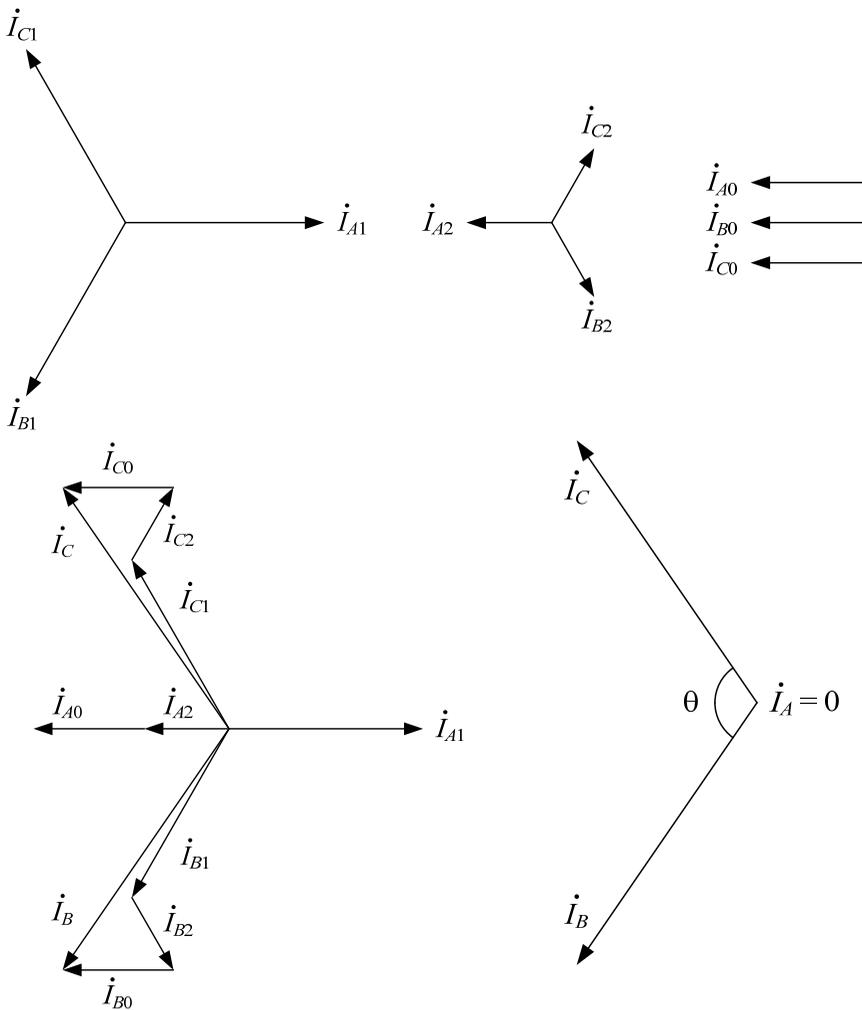


Рис. 9.8

Ток, протекающий в земле при данном виде повреждения, равен утроенному значению тока нулевой последовательности, то есть

$$I_3 = 3I_0^{(1,1)} = 3I_1^{(1,1)} \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}. \quad (9.68)$$

10. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ТОКАМИ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ТОКАМИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

1. Соотношение между токами трехфазного и двухфазного КЗ:

$$I^{(3)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1}}, \quad I^{(2)} = \sqrt{3}I_1^{(2)}, \quad I_1^{(2)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}}, \quad (10.1)$$

$$\frac{I^{(2)}}{I^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}E_1x_{\Sigma 1}}{E_1(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 2})} = \frac{\sqrt{3}x_{\Sigma 1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}}.$$

Если принять, что $x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2}$, то $\frac{I^{(2)}}{I^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866$.

2. Соотношение между токами трехфазного и однофазного КЗ:

$$I^{(3)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1}}, \quad I^{(1)} = 3I_1^{(1)},$$

$$I_1^{(1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}, \quad (10.2)$$

$$\frac{I^{(1)}}{I^{(3)}} = \frac{3E_1x_{\Sigma 1}}{E_1(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})} = \frac{3x_{\Sigma 1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}.$$

Если $x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 0}$, то $I^{(1)} = I^{(3)}$.

Если $x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2}$, а $x_{\Sigma 0} \rightarrow 0$, то $\frac{I^{(1)}}{I^{(3)}} = 1,5$.

В силу того, что величина тока однофазного КЗ зависит от $x_{\Sigma 0}$, регулируя в сети количество заземленных нейтралей, можно изменять величину тока однофазного КЗ.

3. Соотношение между токами трехфазного и двухфазного КЗ на землю

$$I^{(3)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1}}, \quad I^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}} I_1^{(1,1)},$$

$$I_1^{(1,1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}}, \quad (10.3)$$

$$\frac{I_1^{(1,1)}}{I^{(3)}} = \frac{\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}} E_1 x_{\Sigma 1}}{\left(x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \right) E_1} = \frac{\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}} x_{\Sigma 1}}{x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}}.$$

При $x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2}$ и $x_{\Sigma 0} \rightarrow 0$

$$\frac{I_1^{(1,1)}}{I^{(3)}} = \sqrt{3}.$$

При $x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2}$ и $x_{\Sigma 0} \rightarrow \infty$

$$\frac{I_1^{(1,1)}}{I^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866.$$

11. УЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В МЕСТЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Короткие замыкания, происходящие в энергосистемах, как правило, не являются чисто металлическими, а в месте повреждения горит электрическая дуга, которая характеризуется активным сопротивлением.

Наличие сопротивления дуги в месте повреждения существенно влияет на расчет переходного процесса при несимметричных КЗ.

При анализе несимметричных КЗ в этом случае пользуются следующим приемом.

11.1. Двухфазное короткое замыкание

Двухфазное КЗ изображено на рис. 11.1.

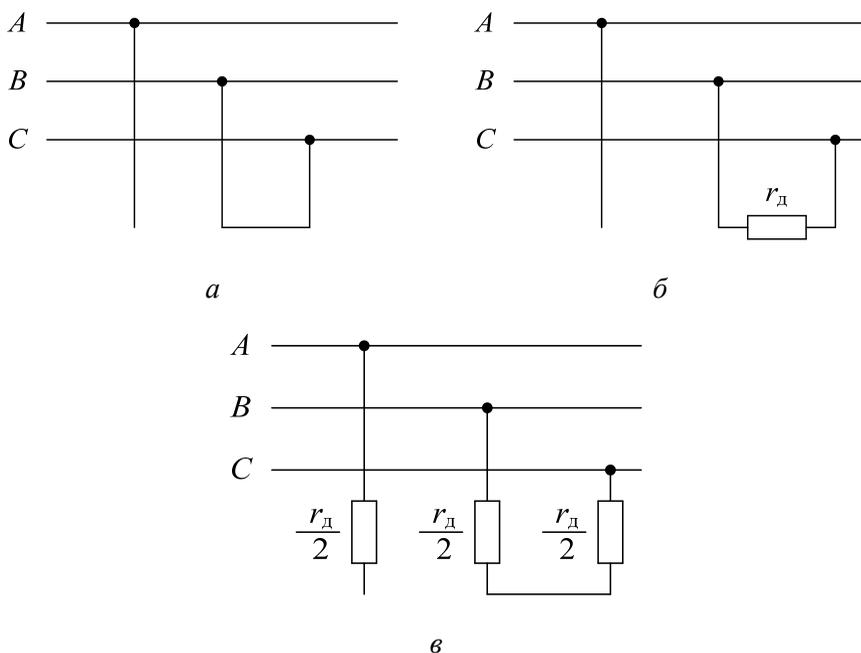


Рис. 11.1

Такое замыкание можно представить как глухое двухфазное КЗ на ответвлении, фазы которого имеют одинаковые сопротивления $\frac{r_d}{2}$. Таким приемом несимметричный участок трехфазной цепи приводят к симметричному (рис. 11.1, в).

С учетом этого

$$Z_{\Sigma 1} = jx_{\Sigma 1} + \frac{r_d}{2};$$

$$Z_{\Sigma 2} = jx_{\Sigma 2} + \frac{r_d}{2};$$

$$I_1^{(2)} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2}} = \frac{\dot{E}_1}{r_d + j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2})}.$$

Напряжение прямой последовательности

$$U_1^{(2)} = I_1^{(2)} \left(jx_{\Sigma 2} + \frac{r_d}{2} \right).$$

11.2. Однофазное короткое замыкание

Однофазное КЗ изображено на рис. 11.2.

Для приведения несимметричного участка трехфазной цепи к симметричному включим сопротивления r_d на ответвлении в другие фазы (рис. 11.2, в).

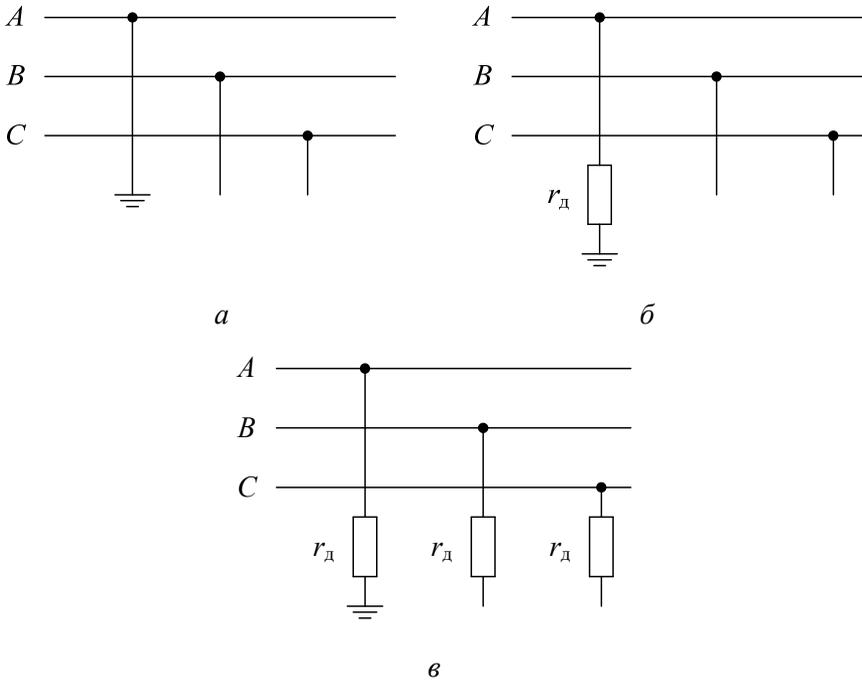


Рис. 11.2

В этом случае изменяются результирующие сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$Z_{\Sigma 1} = jx_{\Sigma 1} + r_d;$$

$$Z_{\Sigma 2} = jx_{\Sigma 2} + r_d;$$

$$Z_{\Sigma 0} = jx_{\Sigma 0} + 3r_d.$$

Соответственно

$$I_1^{(1)} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} = \frac{\dot{E}_1}{3r_d + j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})},$$

а напряжение прямой последовательности

$$U_1^{(1)} = I_1^{(1)} [2r_d + j(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})].$$

11.3. Двухфазное короткое замыкание на землю

Двухфазное КЗ на землю приведено на рис. 11.3.

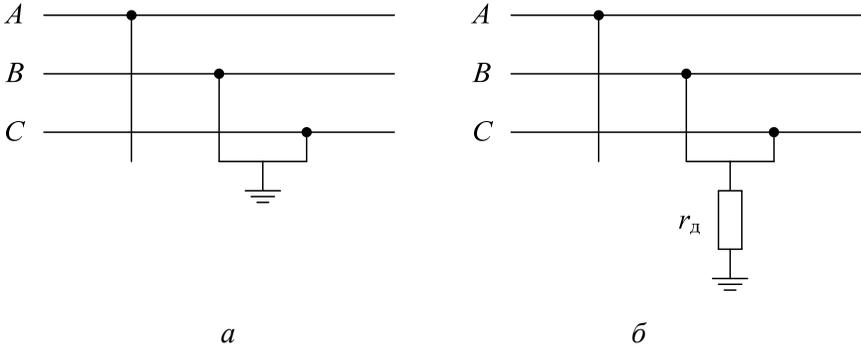


Рис. 11.3

В этом случае через сопротивление r_d протекает только ток нулевой последовательности утроенной величины. В связи с этим изменится лишь сопротивление нулевой последовательности $Z_{\Sigma 0} = jx_{\Sigma 0} + 3r_d$, а $x_{\Sigma 1}$ и $x_{\Sigma 2}$ останутся неизменными.

Поэтому ток прямой последовательности в месте замыкания

$$I_1^{(1)} = \frac{\dot{E}_1}{jx_{\Sigma 1} + \frac{jx_{\Sigma 2}(3r_d + jx_{\Sigma 0})}{3r_d + j(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}}.$$

Напряжение прямой последовательности:

$$U_1^{(1)} = I_1^{(1,1)} [jx_{\Sigma 2} // (3r_d + jx_{\Sigma 0})] = I_1^{(1,1)} \frac{jx_{\Sigma 2}(3r_d + jx_{\Sigma 0})}{3r_d + j(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}.$$

12. ПРАВИЛО ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ПРАВИЛО ЩЕДРИНА) И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В РАСЧЕТАХ

Материал, рассмотренный в предыдущих параграфах, показывает, что токи обратной и нулевой последовательностей и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте несимметричного КЗ. Следовательно, задача расчета любого несимметричного КЗ прежде всего состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ:

$K^{(3)}$ (трехфазное КЗ)

$$I_1^{(3)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1}};$$

$K^{(2)}$ (двухфазное КЗ)

$$I_1^{(2)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}};$$

$K^{(1)}$ (однофазное КЗ)

$$I_1^{(1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}};$$

$K^{(1,1)}$ (однофазное КЗ на землю)

$$I_1^{(1,1)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}}.$$

В самом общем виде можно записать:

$$I_1^{(n)} = \frac{E_1}{x_{\Sigma 1} + \Delta x^{(n)}},$$

где $\Delta x^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, или сопротивление шунта, зависящее от вида короткого замыкания;

n – вид несимметричного КЗ.

Обобщенное выражение для определения тока прямой последовательности и есть математическая запись правила эквивалентности прямой последовательности, которое сформулировал Н. Н. Щедрин.

Ток прямой последовательности при любом виде КЗ может быть определен как ток при симметричном трехфазном КЗ при условии, что действительная точка КЗ удалена на дополнительную реактивность $\Delta x^{(n)}$, называемую шунтом, не зависящую от сопротивления схемы прямой последовательности, а определяемую видом повреждения и результирующим сопротивлением схем обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки КЗ.

$$\Delta x^{(3)} = 0, \quad \Delta x^{(2)} = x_{\Sigma 2};$$

$$\Delta x^{(1)} = x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}, \quad \Delta x^{(1,1)} = \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}.$$

Схемная интерпретация этого положения для различных видов КЗ выглядит следующим образом (рис. 12.1).

Полные (аварийные) токи при различных видах несимметричных КЗ определяются через токи прямой последовательности.

$$I^{(3)} = I_1^{(3)}, \quad I^{(2)} = \sqrt{3} I_1^{(2)},$$

$$I^{(1)} = 3 I_1^{(1)}, \quad I^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}} I_1^{(1,1)}.$$

Или в общем виде

$$I^{(n)} = m^{(n)} I_1^{(n)},$$

где m – коэффициент пропорциональности;

$$m^{(3)} = 1, \quad m^{(2)} = \sqrt{3}, \quad m^{(1)} = 3, \quad m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}}.$$

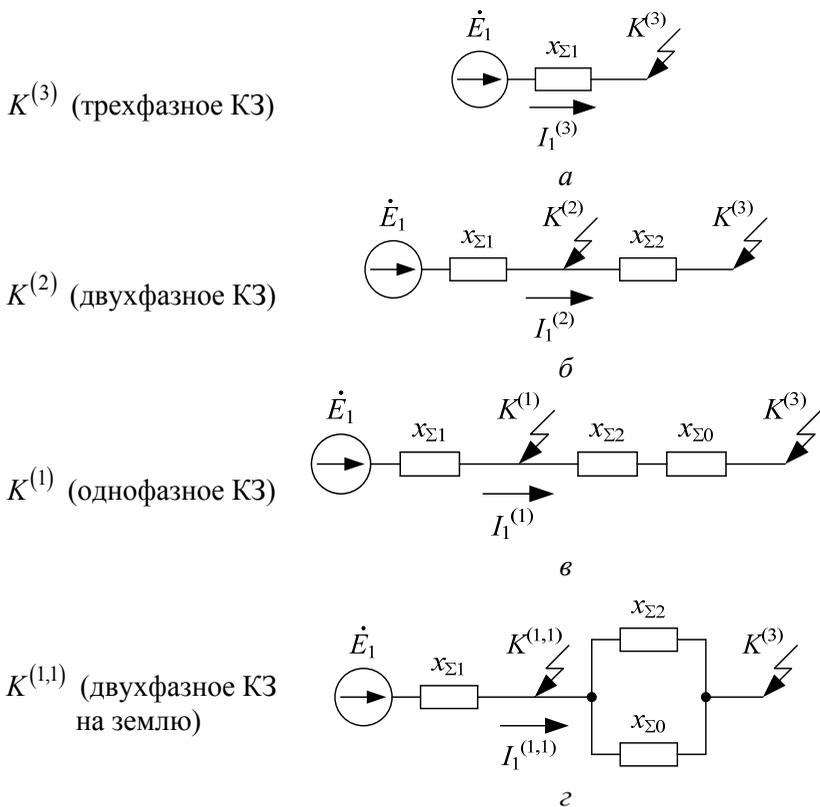


Рис. 12.1

Напряжения прямой последовательности в месте повреждения соответственно равны:

$$U_1^{(3)} = 0, \quad U_1^{(2)} = I_1^{(2)} x_{\Sigma 2},$$

$$U_1^{(1)} = I_1^{(1)} (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}),$$

$$U_1^{(1,1)} = I_1^{(1,1)} \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}},$$

или в общем виде

$$U_1^{(n)} = I_1^{(n)} \Delta x^{(n)}.$$

Эта формула является следствием из правила эквивалентности прямой последовательности.

Другими словами, напряжение прямой последовательности в месте несимметричного КЗ равно падению напряжения от протекания тока прямой последовательности по сопротивлению $\Delta x^{(n)}$.

13. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

При аналитическом расчете несимметричных КЗ в самом общем случае необходимо составить схемы замещения всех трех последовательностей (прямой, обратной и нулевой). Схема прямой последовательности составляется с учетом рассматриваемой стадии переходного процесса. Схемы обратной и нулевой последовательностей не зависят от стадии переходного процесса. По результатам преобразования схем обратной и нулевой последовательностей определяют $x_{\Sigma 2}$ и $x_{\Sigma 0}$, а затем $\Delta x^{(n)}$ в зависимости от рассматриваемого вида КЗ.

Величину шунта $\Delta x^{(n)}$ переносят в схему прямой последовательности и действительную точку КЗ удаляют за этот шунт, рассматривая в новой точке трехфазное КЗ.

Пользуясь правилом эквивалентности прямой последовательности, определяют относительное значение тока прямой последовательности при рассматриваемом несимметричном виде КЗ.

По току прямой последовательности, зная коэффициент пропорциональности $m^{(n)}$ для рассматриваемого вида КЗ, определяют полный ток КЗ. Полученный результат умножают на базисный ток и находят значение аварийного тока (тока КЗ) в именованных единицах.

14. РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ПО РАСЧЕТНЫМ КРИВЫМ

Расчетные кривые могут использоваться для определения тока прямой последовательности в любой момент переходного процесса при любом несимметричном КЗ. Для этого в схеме замещения прямой последовательности в соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности действительную точку КЗ необходимо удалить на величину шунта $\Delta x^{(n)}$ и рассматривать в новой точке симметричное трехфазное КЗ (рис. 14.1).

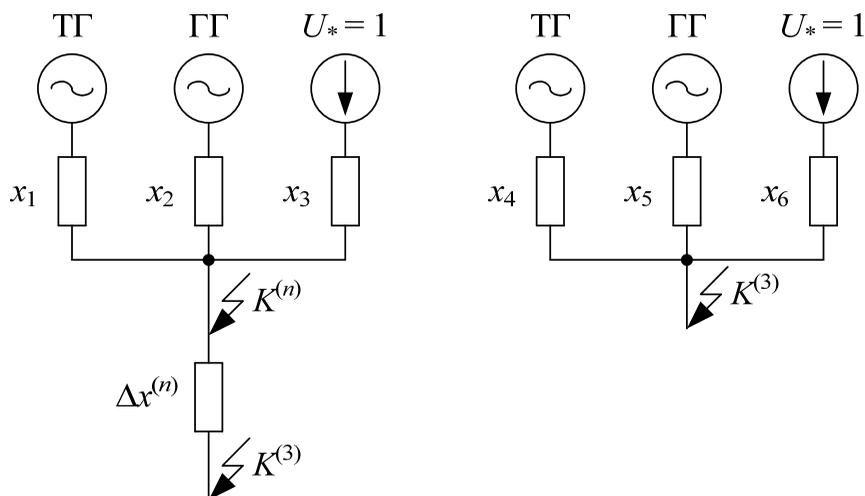


Рис. 14.1

Далее определяют расчетные значения сопротивлений всех лучей схемы, кроме луча системы, при рассматриваемом несимметричном виде КЗ.

$$x_{4 \text{ расч}}^{(n)} = x_4 \frac{S_{\text{HTГ}}}{S_{\text{б}}},$$

$$x_{5 \text{ расч}}^{(n)} = x_5 \frac{S_{\text{HTГ}}}{S_{\text{б}}},$$

где $S_{\text{HTГ}}$ – суммарная мощность ветви турбогенераторов;

$S_{\text{HTГ}}$ – суммарная мощность ветви гидрогенераторов.

Зная расчетные сопротивления лучей, взяв соответствующие кривые, определяют относительные значения периодической составляющей тока прямой последовательности для интересующих нас моментов времени при рассматриваемом виде КЗ (рис. 14.2).

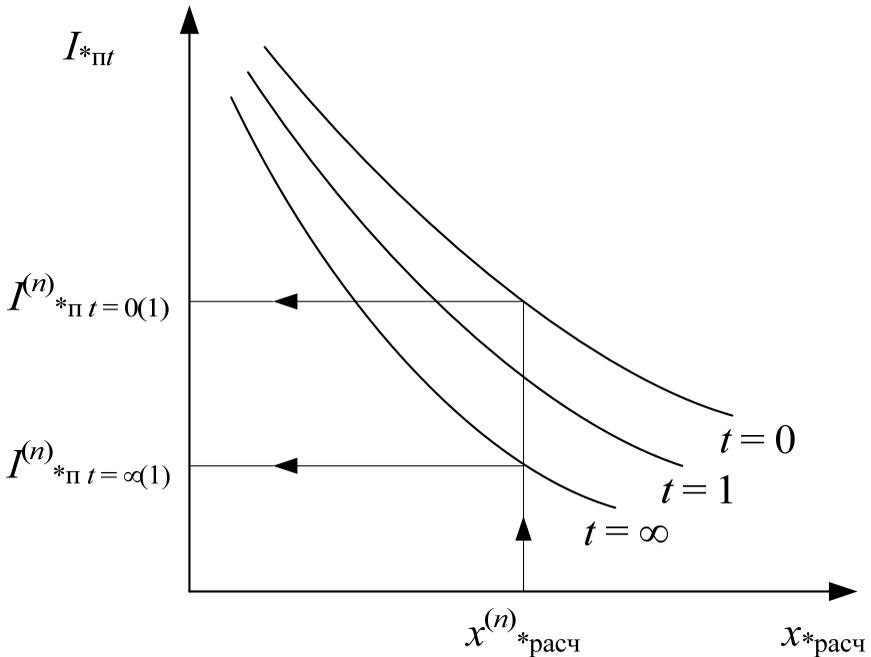


Рис. 14.2

Ток прямой последовательности от луча системы для любого момента времени будет определяться

$$I_{*п(1)с}^{(n)} = I_{*п∞(1)с}^{(n)} = \frac{1}{x_6}.$$

Для получения действительных значений токов прямой последовательности каждого луча необходимо относительные значения токов умножить на номинальные токи лучей, а для луча системы – на базисный ток. Все токи должны быть приведены к ступени напряжения, на которой находится точка КЗ.

$$I_{нТГ} = \frac{S_{нТГ}}{\sqrt{3}U_{ср н}}, \text{ кА}, \quad I_{нГГ} = \frac{S_{нГГ}}{\sqrt{3}U_{ср н}}, \text{ кА};$$

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{ср н}}, \text{ кА};$$

$$I_{п(1)t=0ТГ}^{(n)} = I_{*п(1)t=0ТГ}^{(n)} I_{нТГ}, \text{ кА};$$

$$I_{п(1)t=\inftyТГ}^{(n)} = I_{*п(1)t=\inftyТГ}^{(n)} I_{нТГ}, \text{ кА};$$

$$I_{п(1)t=0ГГ}^{(n)} = I_{*п(1)t=0ГГ}^{(n)} I_{нГГ}, \text{ кА};$$

$$I_{п(1)t=\inftyГГ}^{(n)} = I_{*п(1)t=\inftyГГ}^{(n)} I_{нГГ}, \text{ кА};$$

$$I_{п(1)t=0с}^{(n)} = I_{п(1)t=\inftyс}^{(n)} = I_{*п(1)с}^{(n)} I_{\delta}, \text{ кА}.$$

Зная ток прямой последовательности от каждого из лучей, для интересующих моментов времени получают ток прямой последовательности в месте рассматриваемого несимметричного КЗ.

$$I_{(1)}^{(n)} = I_{\Pi(1)t=0_{\Gamma\Gamma}}^{(n)} + I_{\Pi(1)t=0_{\Gamma\Gamma}}^{(n)} + I_{\Pi(1)t=0_C}^{(n)} ;$$

$$I_{(1)\infty}^{(n)} = I_{\Pi(1)t=\infty_{\Gamma\Gamma}}^{(n)} + I_{\Pi(1)t=\infty_{\Gamma\Gamma}}^{(n)} + I_{\Pi(1)t=\infty_C}^{(n)} .$$

Аварийный (полный) ток в поврежденных фазах получают путем умножения тока прямой последовательности на коэффициент пропорциональности $m^{(n)}$ для рассматриваемого вида несимметричного КЗ.

$$I^{(n)} = m^{(n)} I_{(1)}^{(n)}, \quad I_{\infty}^{(n)} = m^{(n)} I_{(1)\infty}^{(n)}.$$

15. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Фазные токи и напряжения при несимметричных КЗ удобнее всего определять путем суммирования симметричных составляющих этих токов и напряжений. Для определения составляющих токов в любой ветви и напряжений в любой точке схемы при несимметричных КЗ в конкретной точке находят распределение токов и напряжений каждой последовательности в одноименных схемах, пользуясь при этом известными правилами и законами распределения токов и напряжений в линейных электрических цепях.

При определении фазных величин за трансформаторами нужно иметь в виду, что токи и напряжения при переходе через трансформатор изменяются не только по величине, но и по фазе, в зависимости от группы соединения обмоток трансформатора.

Для составляющих прямой последовательности при трансформации со стороны звезды на треугольник происходит поворот векторов на угол $e^{-j30^\circ N}$, а векторов обратной последовательности – на угол $e^{j30^\circ N}$, где N – номер группы соединения обмоток трансформатора.

С учетом сказанного:

$$\dot{F}_{a1} = \dot{F}_{A1} e^{-j30^\circ N} \frac{1}{K};$$

$$\dot{F}_{a2} = \dot{F}_{A2} e^{j30^\circ N} \frac{1}{K},$$

где \dot{F}_{A1} \dot{F}_{A2} – векторы прямой и обратной последовательности обмотки, соединенной в звезду;

\dot{F}_{a1} и \dot{F}_{a2} – векторы прямой и обратной последовательностей обмотки, соединенной в треугольник;

$K = \frac{\sqrt{3}W_Y}{W_\Delta}$ – линейный коэффициент трансформации;

W_Y и W_Δ – число витков фазных обмоток.

Для трансформатора со схемой соединения Y_0/Δ -11:

$$\dot{F}_{a1} = \dot{F}_{A1} e^{-j330^\circ N} \frac{1}{K} = \frac{1}{K} \dot{F}_{A1} e^{j30^\circ};$$

$$\dot{F}_{a2} = \frac{1}{K} \dot{F}_{A2} e^{-j30^\circ}.$$

Отсюда видим, что для трансформатора с такой группой соединения обмоток, векторы прямой последовательности поворачиваются на угол 30° в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности – на 30° в противоположном направлении (рис. 15.1).

$$\dot{F}_a = \dot{F}_{a1} + \dot{F}_{a2} = \frac{1}{K} \left(\dot{F}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{F}_{A2} e^{-j30^\circ} \right).$$

При переходе через трансформатор в обратном направлении угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

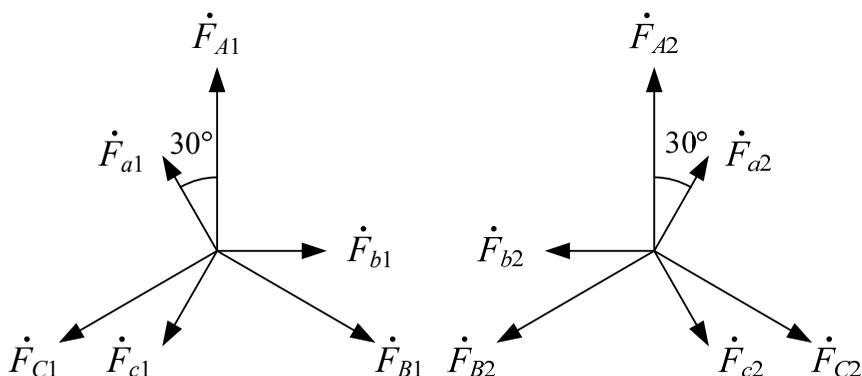


Рис. 15.1

Наиболее простые соотношения получаются для трансформатора с соединением обмоток по группе $Y_0/Y-12$, так как в этом случае угловые смещения токов и напряжений вообще отсутствуют. Из выражений, полученных для трансформатора с соединением обмоток по схеме $Y_0/\Delta-11$, следует, что токи и напряжения за треугольником не содержат составляющих нулевой последовательности.

Если, например, трансформатор имеет группу соединений $Y_0/\Delta-11$, то для фазы A на низкой стороне трансформатора будем иметь

$$\dot{U}_a = \frac{1}{K} (\dot{U}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{U}_{A2} e^{-j30^\circ});$$

$$\dot{I}_a = (\dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ}) K.$$

В случае, когда имеется соединение обмоток трансформатора Y_0/Y_0 , должны быть учтены трансформируемые составляющие нулевой последовательности.

Следует особо подчеркнуть, что если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги.

16. КОМПЛЕКСНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Установленные в предыдущих темах соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений при различных несимметричных КЗ позволяют для каждого конкретного вида КЗ соединить между собой схемы отдельных последовательностей и тем самым получить комплексную схему замещения. Эти схемы особенно удобны при использовании в расчетах несимметричных КЗ расчетных столов и моделей, так как в этом случае имеется возможность с помощью приборов измерить напряжение отдельных последовательностей в тех или иных узлах и токи отдельных последовательностей в тех или иных ветвях схемы.

1. Трехфазное КЗ – $K^{(3)}$ (рис. 16.1).

$$\dot{U}_1^{(3)} = \dot{U}_2^{(3)} = \dot{U}_0^{(3)} = 0;$$

$$\dot{i}_1^{(3)} = \dot{i}^{(3)}.$$

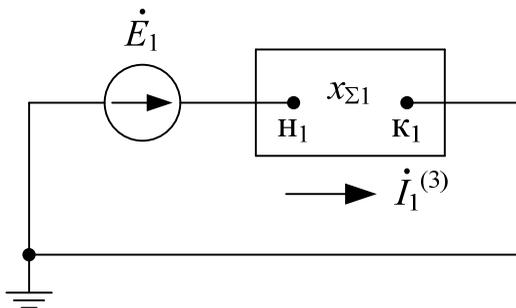


Рис. 16.1

2. Двухфазное КЗ – $K^{(2)}$ (рис. 16.2).

$$\dot{U}_1^{(2)} = \dot{U}_2^{(2)};$$

$$\dot{i}_1^{(2)} = -\dot{i}_2^{(2)}.$$

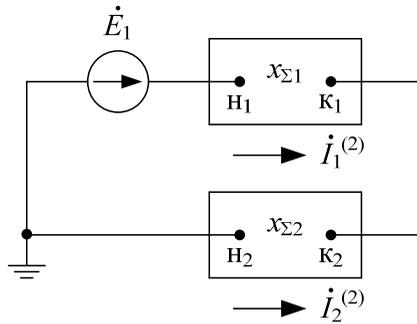


Рис. 16.2

3. Однофазное КЗ – $K^{(1)}$ (рис. 16.3).

$$\dot{U}_1^{(1)} = -(\dot{U}_2^{(1)} + \dot{U}_0^{(1)});$$

$$\dot{i}_1^{(1)} = \dot{i}_2^{(1)} = \dot{i}_0^{(1)}.$$

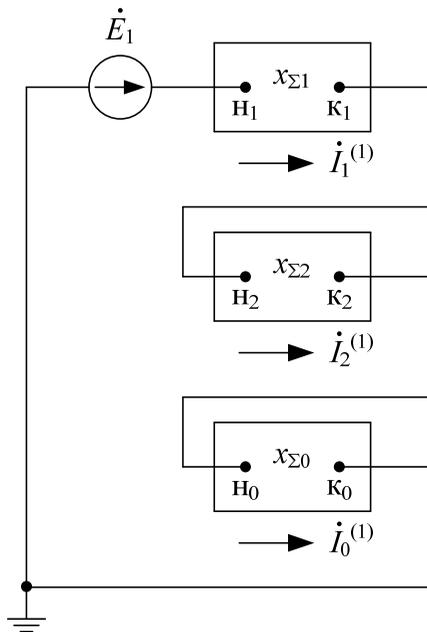


Рис. 16.3

4. Двухфазное КЗ на землю – $K^{(1,1)}$ (рис. 16.4).

$$\dot{U}_1^{(1,1)} = \dot{U}_2^{(1,1)} = \dot{U}_0^{(1,1)};$$

$$I_1^{(1,1)} = -(I_2^{(1,1)} + I_0^{(1,1)}).$$

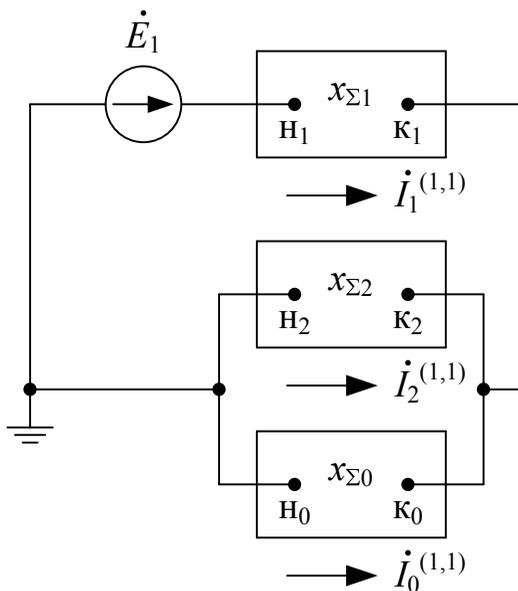


Рис. 16.4

17. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ

Продольная несимметрия имеет место в энергетической системе при обрыве фаз линии или одновременном замыкании контактов высоковольтных выключателей. Продольную несимметрию в точке трехфазной сети можно представить как включение в этой точке неодинаковых сопротивлений в каждую фазу (рис. 17.1).

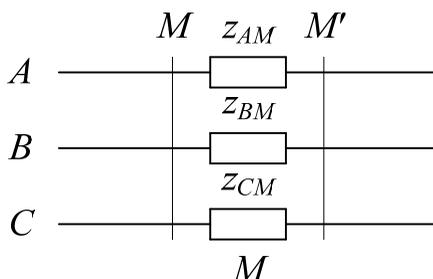


Рис. 17.1

$$Z_{AM} \neq Z_{BM} \neq Z_{CM}.$$

Падения напряжений в точке M $\Delta \dot{U}_M$ будут несимметричны, и их можно разложить на симметричные составляющие (рис. 17.2).

В этом случае в сети протекают асимметричные токи, которые также можно разложить на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При данном виде несимметрии по образу и подобию поперечной несимметрии (несимметричные КЗ) для каждой из последовательностей можно записать уравнения связи между симметричными составляющими:

$$\dot{E}_1 = \Delta \dot{U}_1 + j \dot{I}_1 x_{\Sigma 1}, \quad (17.1)$$

$$0 = \Delta \dot{U}_2 + j \dot{I}_2 x_{\Sigma 2}, \quad (17.2)$$

$$0 = \Delta \dot{U}_0 + j \dot{I}_0 x_{\Sigma 0}. \quad (17.3)$$

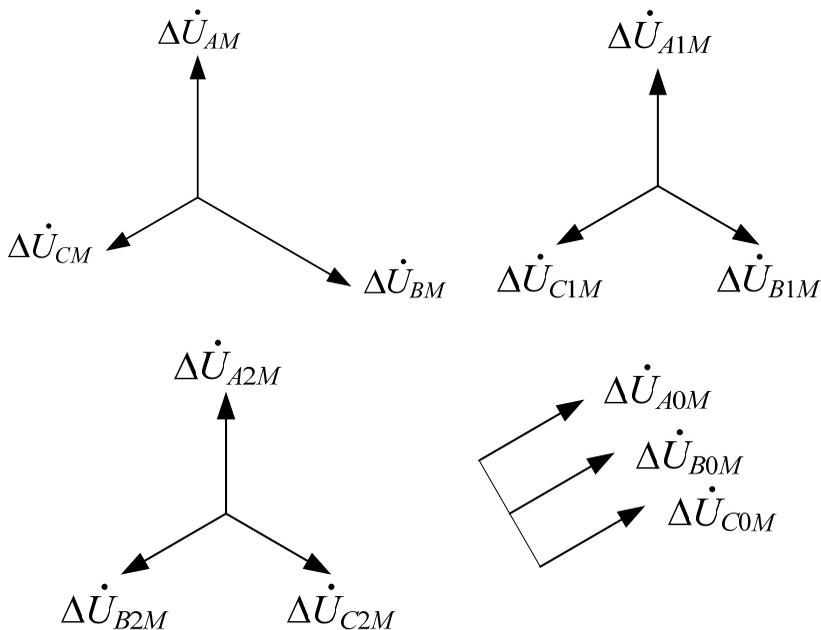


Рис. 17.2

Для решения данной системы уравнений недостающие три уравнения будут записываться из граничных условий каждого конкретного вида продольной несимметрии.

При составлении схем замещения отдельных последовательностей при продольной несимметрии падения напряжений отдельных последовательностей необходимо включать в расщелку фазы в месте повреждения соответствующей схемы замещения.

Рассмотрим пример составления схем замещения отдельных последовательностей при поперечной несимметрии в точке K и продольной в точке M (рис. 17.3).

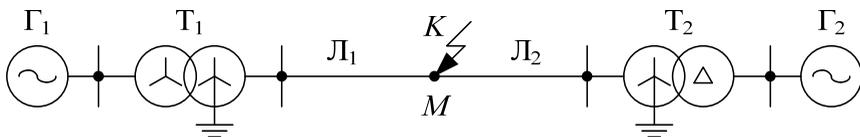


Рис. 17.3

Схемы замещения прямой последовательности:

а) поперечная несимметрия (КЗ) в точке K (рис. 17.4);

$$x_{\Sigma 1} = (x_{Г1} + x_{Т1} + x_{Л1}) // (x_{Г2} + x_{Т2} + x_{Л2}), \quad (17.4)$$

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_1(x_{Г2} + x_{Т2} + x_{Л2}) + E_2(x_{Г1} + x_{Т1} + x_{Л1})}{x_{Г1} + x_{Т1} + x_{Л1} + x_{Г2} + x_{Т2} + x_{Л2}}; \quad (17.5)$$

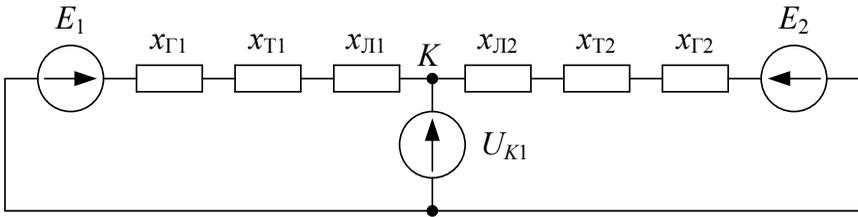


Рис. 17.4

б) продольная несимметрия (обрыв фазы) в точке M (рис. 17.5);

$$x_{\Sigma 1} = x_{Г1} + x_{Т1} + x_{Л1} + x_{Г2} + x_{Т2} + x_{Л2}. \quad (17.6)$$

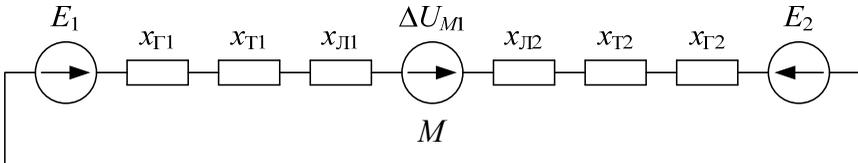


Рис. 17.5

Наибольшее значение ЭДС может быть

$$E_{\text{экв}} = E_1 + E_2. \quad (17.7)$$

Схемы замещения обратной последовательности:

а) поперечная несимметрия (КЗ) в точке K (рис. 17.6);

$$x_{\Sigma 2} = (x_{Г1} + x_{Т1} + x_{Л1}) // (x_{Г2} + x_{Т2} + x_{Л2}); \quad (17.8)$$

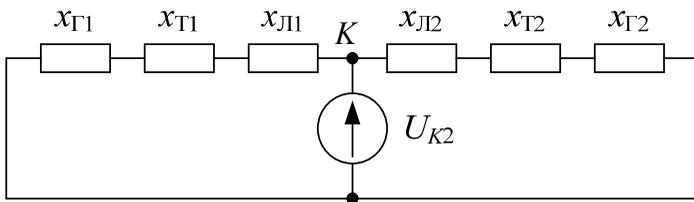


Рис. 17.6

б) продольная несимметрия (обрыв фазы) в точке M (рис. 17.7);

$$x_{\Sigma 2} = x_{Г1} + x_{Т1} + x_{Л1} + x_{Г2} + x_{Т2} + x_{Л2}. \quad (17.9)$$

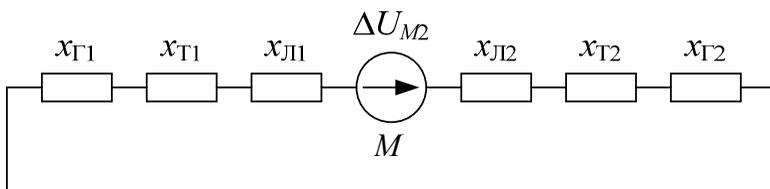


Рис. 17.7

Схемы нулевой последовательности:

а) поперечная несимметрия (КЗ) в точке K (рис. 17.8);

$$x_{\Sigma 0} = (x_{\mu 0} + x_{Г1} + x_{Л1}) // (x_{Г2} + x_{Л2}); \quad (17.10)$$

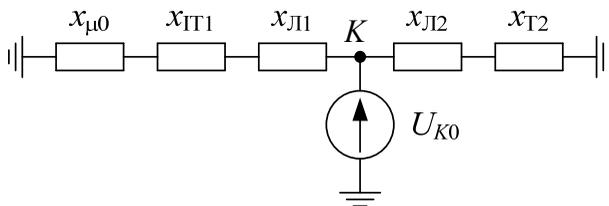


Рис. 17.8

б) продольная несимметрия (обрыв фазы) в точке M (рис. 17.9);

$$x_{\Sigma 0} = x_{\mu 0} + x_{Г1} + x_{Л1} + x_{Г2} + x_{Л2}. \quad (17.11)$$

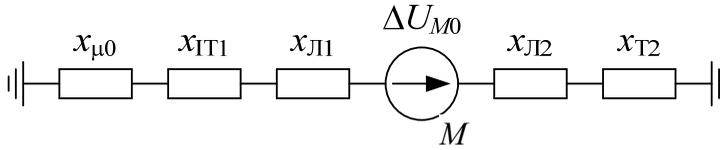


Рис. 17.9

17.1. Разрыв одной фазы

Разрыв одной фазы (рис. 17.10).

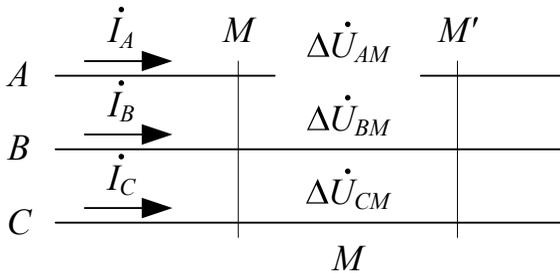


Рис. 17.10

Симметричные составляющие падения напряжений в месте разрыва и симметричные составляющие токов, протекающих в сети, связаны между собой следующими уравнениями:

$$\dot{E}_1 = \Delta \dot{U}_{1M} + j \dot{I}_1 x_{\Sigma 1}; \quad (17.12)$$

$$0 = \Delta \dot{U}_{2M} + j \dot{I}_2 x_{\Sigma 2}; \quad (17.13)$$

$$0 = \Delta \dot{U}_{0M} + j \dot{I}_0 x_{\Sigma 0}. \quad (17.14)$$

Граничные условия при данном виде повреждения

$$\dot{I}_A = 0; \quad (17.15)$$

$$\Delta \dot{U}_{BM} = 0; \quad (17.16)$$

$$\Delta \dot{U}_{CM} = 0. \quad (17.17)$$

Уравнения, описывающие переходный процесс при этом виде повреждения, аналогичны уравнениям, описывающим переходный процесс при двухфазном КЗ на землю.

Решая совместно систему уравнений (17.12)–(17.17), мы получим аналогичные зависимости, как и при двухфазном КЗ на землю, для расчета симметричных составляющих тока и падения напряжения.

$$\dot{I}_{M_1} = \frac{\dot{E}_1}{j \left(x_{\Sigma 1} + \Delta x_M^{(1)} \right)}; \quad (17.18)$$

$$\Delta x_M^{(1)} = x_{\Sigma 2} / x_{\Sigma 0}; \quad (17.19)$$

$$\dot{I}_{M_2} = -\dot{I}_{M_1} \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}; \quad (17.20)$$

$$\dot{I}_{M_0} = -\dot{I}_{M_1} \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}; \quad (17.21)$$

$$\Delta \dot{U}_{M_1} = \Delta \dot{U}_{M_2} = \Delta \dot{U}_{M_0} = j \dot{I}_{M_1} \Delta x_M^{(1)}; \quad (17.22)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{AM} &= \Delta \dot{U}_{M_1} + \Delta \dot{U}_{M_2} + \Delta \dot{U}_{M_0} = \\ &= 3 \Delta \dot{U}_{M_1} = 3 j \dot{I}_{M_1} \Delta x_M^{(1)}; \end{aligned} \quad (17.23)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{BM} &= \dot{I}_{BM_1} + \dot{I}_{BM_2} + \dot{I}_{BM_0} = \\ &= a^2 \dot{I}_{M_1} + a \dot{I}_{M_2} + \dot{I}_{M_0} = \dot{I}_{M_1} \left(a^2 - \frac{a x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right); \end{aligned} \quad (17.24)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{CM} &= \dot{I}_{CM_1} + \dot{I}_{CM_2} + \dot{I}_{CM_0} = \\ &= a\dot{I}_{M_1} + a^2\dot{I}_{M_2} + \dot{I}_{M_0} = \dot{I}_{M_1} \left(a - \frac{a^2 x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}} \right); \end{aligned} \quad (17.25)$$

$$I_{BM} = I_{CM} = I_{M_1} \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 0} x_{\Sigma 2}}{(x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2})^2}}. \quad (17.26)$$

17.2. Разрыв двух фаз

Разрыв двух фаз (рис. 17.11).

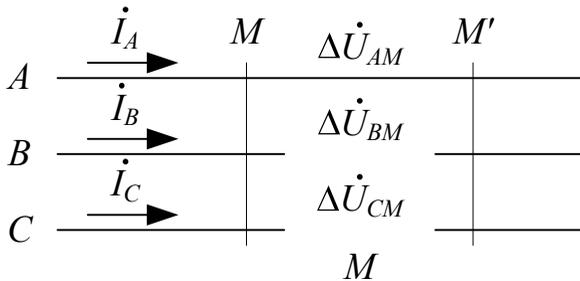


Рис. 17.11

Уравнения, связывающие между собой симметричные составляющие токов и падений напряжений в месте несимметрии, в этом случае те же, что и при разрыве одной фазы, то есть (17.12)–(17.14).

Граничные условия при данном виде повреждения будут:

$$\Delta \dot{U}_{AM} = 0; \quad (17.27)$$

$$\dot{I}_B = 0; \quad (17.28)$$

$$\dot{I}_C = 0. \quad (17.29)$$

Система уравнений (17.12)–(17.14) и (17.27)–(17.29), описывающая переходный процесс при данном виде повреждения, аналогична уравнениям, описывающим переходный процесс при однофазном КЗ. Следовательно, при решении данной системы получим аналогичные выражения для определения симметричных составляющих токов и падений напряжений, как и при однофазном КЗ:

$$\dot{I}_{M_1} = \frac{\dot{E}_1}{j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}; \quad (17.30)$$

$$\dot{I}_{M_1} = \dot{I}_{M_2} = \dot{I}_{M_0}; \quad (17.31)$$

$$\dot{I}_{AM} = \dot{I}_{M_1} + \dot{I}_{M_2} + \dot{I}_{M_0} = 3\dot{I}_{M_1}; \quad (17.32)$$

$$\Delta \dot{U}_{M_1} = j\dot{I}_{M_1}(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}); \quad (17.33)$$

$$\Delta \dot{U}_{M_2} = -j\dot{I}_{M_1}x_{\Sigma 2}; \quad (17.34)$$

$$\Delta \dot{U}_{M_0} = -j\dot{I}_{M_1}x_{\Sigma 0}; \quad (17.35)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{BM} &= \Delta \dot{U}_{BM_1} + \Delta \dot{U}_{BM_2} + \Delta \dot{U}_{BM_0} = \\ &= \Delta \dot{U}_{M_1} a^2 + a\Delta \dot{U}_{M_2} + \Delta \dot{U}_{M_0} = \\ &= j\dot{I}_{M_1} \left[a^2(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) - ax_{\Sigma 2} - x_{\Sigma 0} \right] = \\ &= j\dot{I}_{M_1} \left[(a^2 - a)x_{\Sigma 2} + (a^2 - 1)x_{\Sigma 0} \right]; \end{aligned} \quad (17.36)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{CM} &= \Delta \dot{U}_{CM_1} + \Delta \dot{U}_{CM_2} + \Delta \dot{U}_{CM_0} = \\ &= a\Delta \dot{U}_{M_1} + a^2\Delta \dot{U}_{M_2} + \Delta \dot{U}_{M_0} = \\ &= j\dot{I}_{M_1} \left[a(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) - a^2x_{\Sigma 2} - x_{\Sigma 0} \right] = \\ &= j\dot{I}_{M_1} \left[(a - a^2)x_{\Sigma 2} + (a - 1)x_{\Sigma 0} \right]. \end{aligned} \quad (17.37)$$

18. ПОРЯДОК РАСЧЕТА ОДНОКРАТНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ

Характер выражений для симметричных составляющих, полученных при рассмотрении различных видов продольной несимметрии, позволяет сформулировать общий для всех видов продольной несимметрии порядок расчета.

1. Составляют схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, в которых в месте разрыва включены падения напряжений симметричных составляющих ΔU_1 , ΔU_2 , ΔU_0 .

2. Определяют суммарные сопротивления схем прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно точки разрыва.

3. Находят эквивалентную ЭДС $E_{\Sigma 1}$ схемы прямой последовательности.

4. Определяют ток прямой последовательности

$$j_1^{(n)} = \frac{\dot{E}_{\Sigma 1}}{j(x_{\Sigma 1} + \Delta x^{(n)})}.$$

5. По известной величине тока прямой последовательности $j_1^{(n)}$ определяют симметричные составляющие токов и падений напряжений в месте несимметрии.

6. Отдельно для схемы каждой последовательности вычисляют напряжение одного края разрыва. Для этого потенциал начала схем отдельных последовательностей принимают равным нулю и по известным токам определяют потенциалы точек с другого края разрыва.

7. Зная симметричные составляющие токов и падений напряжений по краям несимметрии, рассчитывают их полные значения.

19. ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ВИДОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ

При однократной несимметрии (поперечной или продольной), для анализа составлялось 6 уравнений, с помощью которых устанавливалась связь между симметричными составляющими токов и напряжений рассматриваемого вида повреждения.

При двукратной несимметрии (сложный вид повреждения) определению подлежат 12 неизвестных (симметричные составляющие токов и напряжений в каждом из мест повреждений). Поэтому для анализа такого вида повреждения необходимо составить 12 уравнений, 6 из которых будут связывать симметричные составляющие токов и напряжений в каждом из мест повреждений, а другие 6 получаются из граничных условий с учетом конкретных видов повреждения.

При n -кратной несимметрии необходимо составлять $6n$ уравнений, решая которые, определяют несимметричные составляющие токов и напряжений в каждом из мест повреждения. Для уточнения порядка расчета сложных видов повреждений представим себе схему, в которой в точках M и N одновременно имеются однофазные КЗ (рис. 19.1).

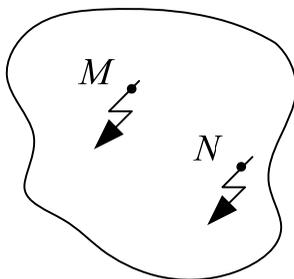


Рис. 19.1

Составляя схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, после преобразования их можно привести к следующему виду (рис. 19.2).

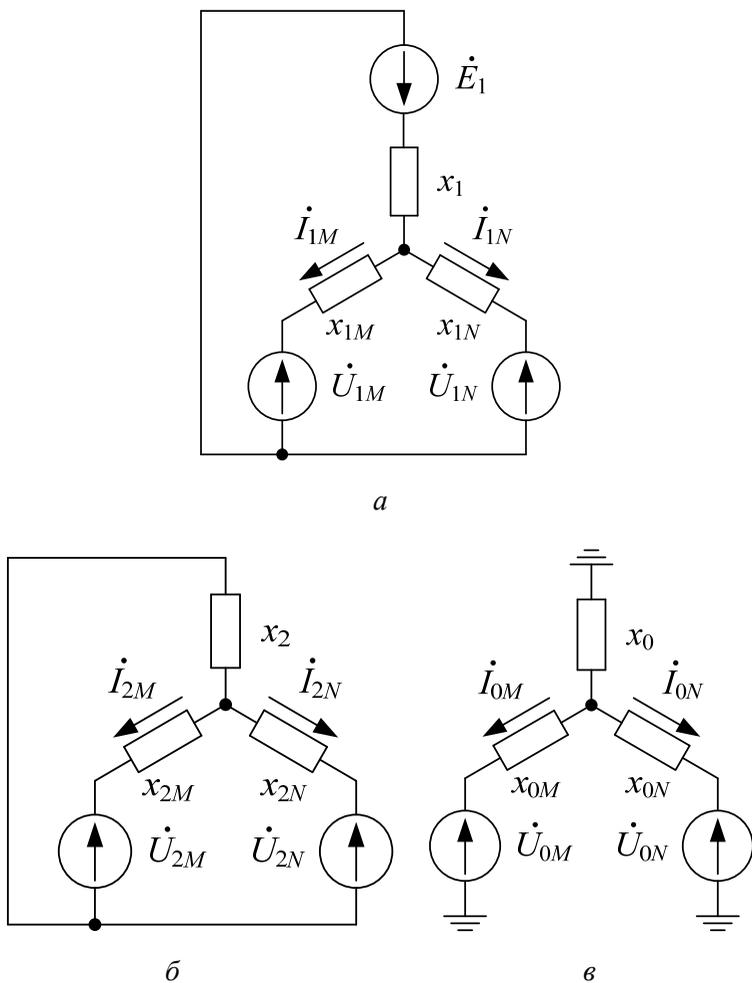


Рис. 19.2

Для каждой из схем можно записать по два уравнения, связывающие симметричные составляющие токов и напряжений.

$$M: \dot{E}_1 = \dot{U}_{1M} + \dot{I}_{1M} jx_{1M} + jx_1 (\dot{I}_{1M} + \dot{I}_{1N}),$$

$$N: \dot{E}_1 = \dot{U}_{1N} + \dot{I}_{1N} jx_{1N} + jx_1 (\dot{I}_{1M} + \dot{I}_{1N}),$$

$$M: 0 = \dot{U}_{2M} + \dot{I}_{2M} jx_{2M} + jx_2 (\dot{I}_{2M} + \dot{I}_{2N});$$

$$N: 0 = \dot{U}_{2N} + \dot{I}_{2N} jx_{2N} + jx_2 (\dot{I}_{2M} + \dot{I}_{2N});$$

$$M: 0 = \dot{U}_{0M} + \dot{I}_{0M} jx_{0M} + jx_0 (\dot{I}_{0M} + \dot{I}_{0N});$$

$$N: 0 = \dot{U}_{0N} + \dot{I}_{0N} jx_{0N} + jx_0 (\dot{I}_{0M} + \dot{I}_{0N}).$$

Недостающие 6 уравнений запишем из граничных условий, предположив что в точке M замкнута на землю фаза B , а в точке N – фаза C (рис. 19.3).

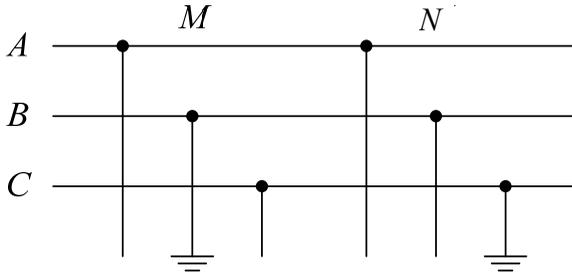


Рис. 19.3

$$M: \dot{I}_C = 0;$$

$$\dot{I}_A = 0;$$

$$\dot{U}_B = 0;$$

$$N: \dot{I}_A = 0;$$

$$\dot{I}_B = 0;$$

$$\dot{U}_C = 0.$$

При рассмотрении однофазного КЗ были получены следующие соотношения для поврежденной фазы:

$$M: \dot{I}_{1B} = \dot{I}_{2B} = \dot{I}_{0B}; \quad (19.1)$$

$$\dot{U}_{1B} + \dot{U}_{2B} + \dot{U}_{0B} = 0; \quad (19.2)$$

$$N: \dot{I}_{1C} = \dot{I}_{2C} = \dot{I}_{0C}; \quad (19.3)$$

$$\dot{U}_{1C} + \dot{U}_{2C} + \dot{U}_{0C} = 0. \quad (19.4)$$

С учетом конкретных видов КЗ в точках M и N перепишем основные уравнения:

$$M: \dot{E}_1 = \dot{U}_{1B} + \dot{I}_{1B} j x_{1M} + j x_1 (\dot{I}_{1B} + \dot{I}_{1C}); \quad (19.5)$$

$$N: \dot{E}_1 = \dot{U}_{1C} + \dot{I}_{1C} j x_{1N} + j x_1 (\dot{I}_{1B} + \dot{I}_{1C}); \quad (19.6)$$

$$M: 0 = \dot{U}_{2B} + \dot{I}_{2B} j x_{2M} + j x_2 (\dot{I}_{2B} + \dot{I}_{2C}); \quad (19.7)$$

$$N: 0 = \dot{U}_{2C} + \dot{I}_{2C} j x_{2N} + j x_2 (\dot{I}_{2B} + \dot{I}_{2C}); \quad (19.8)$$

$$M: 0 = \dot{U}_{0B} + \dot{I}_{0B} j x_{0M} + j x_0 (\dot{I}_{0B} + \dot{I}_{0C}); \quad (19.9)$$

$$N: 0 = \dot{U}_{0C} + \dot{I}_{0C} j x_{0N} + j x_0 (\dot{I}_{0B} + \dot{I}_{0C}). \quad (19.10)$$

Сложив уравнения (19.5), (19.7) и (19.9) для точки M с учетом (19.1) и (19.2), а для точки N уравнения (19.6), (19.8) и (19.10) с учетом (19.3) и (19.4), получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 = j \dot{I}_{1B} (x_{1M} + x_{2M} + x_{0M}) + \\ + j (x_1 + x_2 + x_0) (\dot{I}_{1B} + \dot{I}_{1C}); \end{aligned} \quad (19.11)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 = j \dot{I}_{1C} (x_{1N} + x_{2N} + x_{0N}) + \\ + j (x_1 + x_2 + x_0) (\dot{I}_{1B} + \dot{I}_{1C}). \end{aligned} \quad (19.12)$$

Решая уравнения (19.11) и (19.12), определяют токи прямой последовательности поврежденных фаз, а затем все остальные неизвестные.

20. ПРОСТОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

При замыкании на землю одной фазы в системе с изолированной нейтралью, путь для тока, идущего на землю, осуществляется через емкостную проводимость элементов каждой фазы относительно земли. Поступая в землю в месте замыкания, ток возвращается по неповрежденным фазам через их емкостные проводимости относительно земли.

Емкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной местом повреждения, и ток в этой фазе за местом замыкания отсутствует (рис. 20.1).

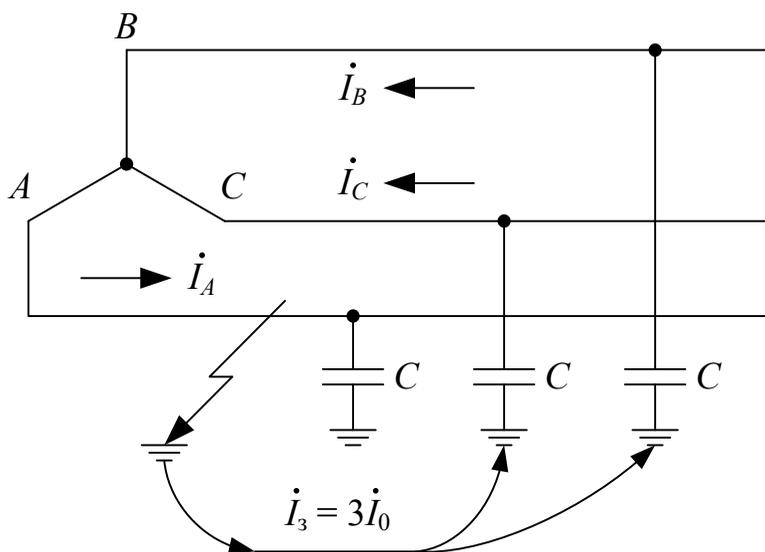


Рис. 20.1

Граничные условия для простого замыкания на землю те же, что и для однофазного короткого замыкания. Поэтому все выражения, полученные при рассмотрении однофазного КЗ, в равной мере относятся к случаю простого замыкания на землю.

Емкостные сопротивления элементов электрической системы значительно превышают их индуктивные и активные сопротивле-

ния, что позволяет при определении тока простого замыкания на землю пренебречь последними и, следовательно, считать, что величина этого тока не зависит от места повреждения в рассматриваемой электрически связанной сети.

Так как этот ток относительно мал, то можно считать, что напряжение источника сохраняется неизменным.

При этих допущениях ток в месте замыкания на землю через дугу с сопротивлением r_d будет:

$$\dot{I}_3 = 3 \frac{\dot{U}_{\phi \text{ ср}}}{3r_d - jx_{C_{0\Sigma}}},$$

где $x_{C_{0\Sigma}}$ – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов, электрически связанных с точкой замыкания;

$\dot{U}_{\phi \text{ ср}}$ – среднее фазное напряжение той ступени, где рассматривается замыкание на землю.

Наибольшая величина тока замыкания на землю имеет место при металлическом замыкании, когда $r_d = 0$:

$$\dot{I}_3 = 3j \frac{\dot{U}_{\phi \text{ ср}}}{x_{C_{0\Sigma}}},$$

то есть она в три раза превышает емкостный ток на землю одной фазы в нормальном режиме.

Для грубой оценки порядка величины тока замыкания на землю пользуются упрощенной формулой:

$$I_3 = \frac{\sqrt{3}U_{\phi \text{ ср}}}{N} l, \text{ А},$$

где l – суммарная длина воздушных или кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания на землю, км;

$U_{\phi \text{ ср}}$ – среднее фазное номинальное напряжение ступени, где рассматривается замыкание на землю, кВ;

N – коэффициент ($N = 350$ – для воздушных линий, $N = 10$ – для кабельных).

Для ограничения величины тока простого замыкания на землю нейтраль трансформатора целесообразно заземлять через индуктивную катушку. Регулируя индуктивность такой катушки, можно добиться резонанса между индуктивностью и емкостью, что приведет к $x_{0\Sigma} = \infty$, то есть к полной компенсации тока простого замыкания на землю.

Такое условие будет выполняться при

$$x_L = \frac{x_{C_{0\Sigma}}}{3}.$$

Такие катушки называются дугогасящими. Они выполняются с регулированием индуктивности и их настраивают таким образом, чтобы снизить ток замыкания на землю до величины, при которой дуги в месте замыкания не возникает.

Опытом установлено, что это условие выполняется, если ток замыкания на землю не превышает:

при 6 кВ – 30 А; 10 кВ – 20 А;

при 15–20 кВ – 15 А; 35 кВ – 10 А.

Из рассмотрения однофазного КЗ, запишем:

$$\dot{U}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{U}_0);$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{I}_1 j x_{\Sigma 2};$$

$$\dot{U}_0 = -\dot{I}_1 j x_{C_{0\Sigma}};$$

$$\dot{I}_1 = j \frac{\dot{U}_{\phi \text{ ср}}}{x_{C_{0\Sigma}}}.$$

Отсюда можно записать

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_{\phi \text{ ср}},$$

$\dot{U}_2 = 0$, так как $x_{\Sigma 2} = 0$ при принятых допущениях, а

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{\phi \text{ ср}}.$$

На основании полученных соотношений изобразим векторную диаграмму напряжений в месте замыкания (рис. 20.2).

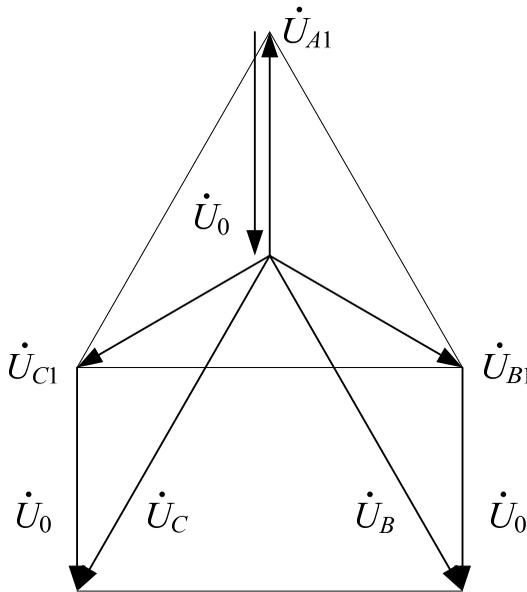


Рис. 20.2

Из векторной диаграммы видно, что при металлическом замыкании на землю напряжения в неповрежденных фазах (\dot{U}_B и \dot{U}_C) возрастают до линейных значений. Треугольник линейных напряжений остается без изменений и лишь перемещается параллельно самому себе. Его положение определяется напряжением нулевой последовательности.

21. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В УСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Электрические установки напряжением до 1000 В характеризуются, как правило, большой электрической удаленностью относительно источников питания.

Это позволяет считать, что при КЗ в такой сети напряжение за трансформатором, питающим эту сеть, остается неизменным и равным своему номинальному значению (рис. 21.1).

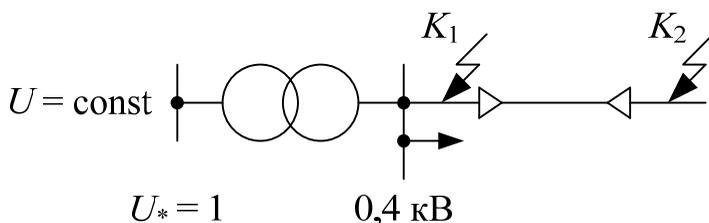


Рис. 21.1

Достоверность расчета токов короткого замыкания в установках до 1000 В главным образом зависит от того, насколько правильно и полно учтены все сопротивления короткозамкнутой цепи.

Наряду с индуктивными сопротивлениями элементов здесь существенную роль играют активные сопротивления, причем они могут преобладать.

На результат расчета заметно влияют сопротивления сборных шин, трансформаторов тока, сопротивления контактных соединений, рубильников, катушек автоматических выключателей, которыми при расчете токов короткого замыкания в установках высокого напряжения всегда пренебрегают.

Точная оценка сопротивлений контактных соединений представляет собой очень трудную и в известной мере неопределенную задачу, так как эти сопротивления зависят от многих факторов (состояния контактных поверхностей, степени затяжки болтов, силы сжатия пружин и прочего). Отказ от учета этих сопротивлений может привести к излишнему преувеличению тока КЗ, что приведет к установке более мощной коммутационной аппаратуры и проводников большего сечения.

При отсутствии достоверных данных о сопротивлении контактных соединений рекомендуется принимать их в пределах 0,015–0,03 Ом. Нижний предел соответствует КЗ у распределительного щита подстанции (K_1), а верхний – при КЗ непосредственно у электроприемников (K_2) (рис. 21.1).

Когда требуется особо повышенная надежность установки до 1000 В, расчет тока КЗ для нее делают без учета сопротивлений контактных соединений, вводя в схему замещения индуктивные и активные сопротивления всех основных элементов цепи.

Поскольку сопротивления большинства элементов рассматриваемых установок задаются в именованных единицах, то весь расчет обычно ведут так же в именованных единицах, при этом ввиду малости самих сопротивлений их выражают в миллиомах (МОм).

В качестве средних номинальных напряжений U_{cp} для соответствующих ступеней трансформации рекомендуется принимать:

$$690, 525, 400, 230, 127 \text{ В.}$$

По найденным результирующим сопротивлениям прямой и нулевой последовательности относительно точки короткого замыкания $r_{\Sigma 1}$, $r_{\Sigma 0}$, $x_{\Sigma 1}$, $x_{\Sigma 0}$ легко определить начальное значение периодической слагающей тока трехфазного короткого замыкания

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3}\sqrt{r_{\Sigma 1}^2 + x_{\Sigma 1}^2}} = \frac{U_{cp}, \text{ В}}{\sqrt{3}Z_{\Sigma 1}, \text{ МОм}}, \text{ кА,}$$

а так же однофазного КЗ:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{3U_{cp}}{\sqrt{3}\sqrt{(2r_{\Sigma 1} + r_{\Sigma 0})^2 + (2x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 0})^2}} = \frac{\sqrt{3}U_{cp}, \text{ В}}{Z^{(1)}, \text{ МОм}}, \text{ кА.}$$

С ростом удаленности короткого замыкания отношение $\frac{x}{r}$, как правило, падает, что приводит к снижению ударного коэффициента.

$$k_y = f\left(\frac{x}{r}\right) \text{ изменяется от } 1,05 \text{ до } 1,5.$$

22. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ КАЧАНИЙ СИНХРОННЫХ МАШИН

В соответствии с принятыми допущениями до сих пор предполагалось, что возникший в системе электромагнитный переходный процесс не сопровождается качаниями синхронных машин этой системы.

В действительности же при любом внезапном изменении стационарного режима в той или иной мере проявляются качания всех или части участвующих машин.

Точный анализ поведения синхронного генератора в этих условиях связан с необходимостью одновременного рассмотрения электромагнитных и электромеханических явлений и является задачей исследования динамической устойчивости.

Рассмотрим только качественную сторону влияния качаний синхронных генераторов на величину токов и напряжений в системе при внезапном КЗ.

Будем считать, что известен закон изменения углового сдвига между ЭДС источников питания во времени. Для упрощения теоретических выкладок рассмотрим схему, в которой один генератор (или станция, заменяется эквивалентным генератором) связан с системой бесконечной мощности по сети, обладающей чисто индуктивными сопротивлениями (рис. 22.1).

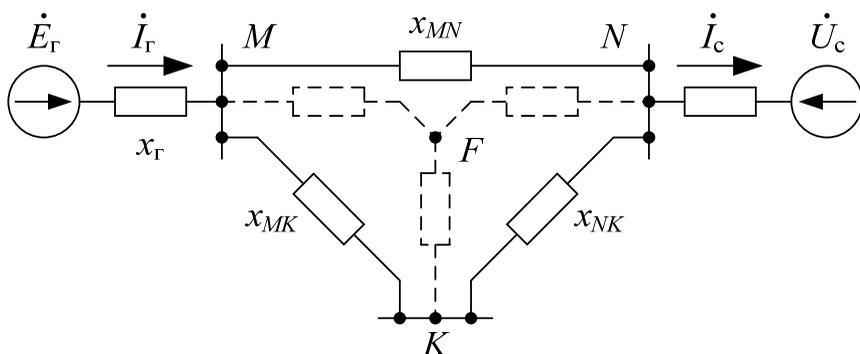


Рис. 22.1

Вся мощность от генератора передается в систему, то есть в промежуточных узлах M , K , N отсутствуют потребители.

Рассмотрим, как изменяется ток генератора и напряжения в указанных узлах M , K , N с увеличением угла δ между ЭДС $\dot{E}_Г$ и напряжением \dot{U}_c (рис. 22.2).

С увеличением угла δ разность $\dot{E}_Г - \dot{U}_c$ возрастает и пропорционально ей возрастает ток генератора.

Соответственно увеличиваются падения напряжения на участках сети, что приводит к снижению напряжений во всех точках.

Напряжение узла K очевидно будет таким же, как и узла F .

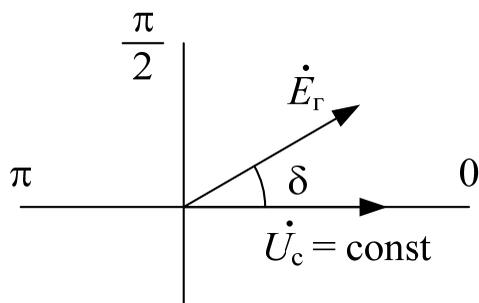


Рис. 22.2

Наибольший ток и соответственно наименьшее напряжение в узлах будет иметь место при $\delta = \pi$, то есть когда $\dot{E}_Г$ и \dot{U}_c находятся в противофазе. Построим эпюры тока и напряжений в узлах в зависимости от угла δ , причем за единицу тока и напряжений каждого узла принимаем их значения при $\delta = 0$ (рис. 22.3).

Из характера кривых следует, что изменение угла δ сказывается весьма существенно на изменении тока и напряжения в узлах. Особенно резко оно отражается на изменении напряжения узла K , где последнее падает до нуля. Однако нужно заметить, что это стало следствием заданных исходных условий. Достаточно изменить соотношения между реактивностями схемы или между величинами $\dot{E}_Г$ и \dot{U}_c , чтобы напряжение в этом узле не снижалось до нуля.

Точку энергосистемы, где напряжение имеет наименьшую величину при рассматриваемом исходном режиме, называют электрическим центром.

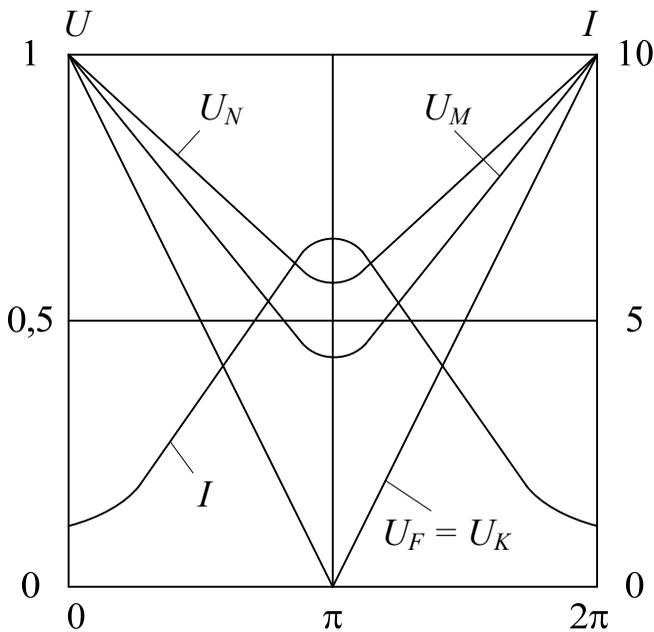


Рис. 22.3

Его положение в системе меняется по мере изменения ее режима.

Теперь представим себе, что именно в точке K схемы произошло трехфазное КЗ. В этом случае характер изменения тока в месте короткого замыкания в функции угла δ аналогичен характеру кривой изменения напряжения U_K , то есть каждый раз, как только $\dot{E}_Г$ и \dot{U}_C будут в противофазе, ток в месте короткого замыкания будет снижаться до нуля. В цепях генератора и системы с увеличением угла δ ток будет возрастать, достигая своей наибольшей величины при $\delta = \pi$.

Изложенное дополнительно проиллюстрируем векторной диаграммой (рис. 22.4). Ток в месте короткого замыкания определяется суммой взаимных токов от системы \dot{I}_C и генератора $\dot{I}_Г$, сдвинутых относительно друг друга на угол δ .

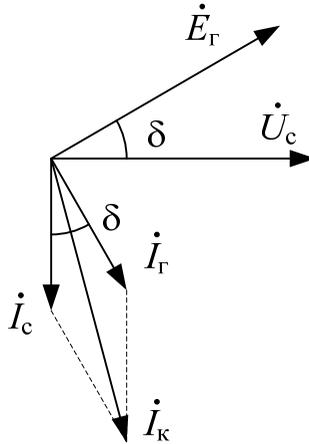


Рис. 22.4

Модуль тока в месте КЗ можно определить:

$$I_K = \sqrt{I_G^2 + I_c^2 + 2I_G I_c \cos \delta}.$$

Максимальное значение тока КЗ имеет место, когда $I_G = I_c = I$.

В этом случае

$$I_K = I\sqrt{2(1 + \cos \delta)}.$$

Наибольшее снижение тока КЗ I_K при заданном угле δ характеризуется следующим отношением:

$$\frac{I_K}{I_K(\delta=0)} = \frac{I_K}{2I} = \frac{I\sqrt{2(1 + \cos \delta)}}{2I} = \sqrt{\frac{1 + \cos \delta}{2}}.$$

При угле $\delta \leq 37^\circ$ это отношение не выходит за пределы 0,95.

Другими словами, если сдвиг между векторами ЭДС источников не превышает примерно 40° , пренебрежение качанием генераторов приводит к превышению тока в месте короткого замыкания не более чем на 5 %, что находится в рамках точности практических расчетов.

23. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Анализ электромагнитных процессов с оценкой их качества необходим для проектирования и правильной эксплуатации электроэнергетических систем.

Качество переходных процессов с точки зрения согласования с требованиями, предъявляемыми к энергетическим системам и их элементам, характеризуют качественными и количественными показателями.

Показателям качества переходных процессов дают оценку по следующим свойствам, характеристикам:

1. По длительности переходного процесса. Это время, в течение которого энергетическая система переходит из одного устойчивого состояния работы в другое установившееся состояние.

Время существования аварийного режима стремятся сократить:

$$\tau = t_{р.з} + t_{с\ отк},$$

где $t_{р.з}$ – время действия релейной защиты;

$t_{с\ отк}$ – время отключения выключателя.

2. По характеру переходного процесса, который оценивают по изменению тока во времени.

Характер электромагнитного переходного процесса зависит от мощности источников, параметров сети, наличия АРВ и АПВ, он может быть апериодическим, колебательным с неизменной или апериодической амплитудой, монотонным.

Качественную оценку характера переходного процесса оценивают по амплитуде, а количественными оценками характера переходного процесса являются:

– коэффициент затухания периодической составляющей тока КЗ

$$\gamma_{пт} = \frac{I_{пт}}{I''};$$

– коэффициент затухания аperiodической составляющей тока КЗ

$$\gamma_{at} = \frac{i_{at}}{i_{at=0}}.$$

3. По опасности последствий для оборудования, которая оценивается электродинамической стойкостью элементов (проверяется по $i_y^{(3)}$), и термической стойкостью (оценивается по тепловому импульсу):

$$B_k = \int_0^t i_k^2(t) dt.$$

где $i_k(t)$ – полный ток КЗ в произвольный момент времени t , А.

4. По существенности влияния параметров аварийного переходного процесса на нормальные режимы работы энергосистемы и ее элементов, которое отражается в показателях качества электроэнергии:

– коэффициент несинусоидальности

$$K_{нс} = \frac{S_{па}}{S_{КЗ}} \leq 0,05,$$

где $S_{па}$ – мощность преобразовательных агрегатов;

$S_{КЗ}$ – мощность короткого замыкания;

– коэффициент несимметрии

$$P_n = \frac{S_{но}}{S_{КЗ}} \leq 0,02,$$

где $S_{но}$ – мощность однофазной нагрузки;

– колебания напряжения

$$\delta U = \frac{\Delta P \frac{R_{\text{рез}}}{x_{\text{рез}}} + \Delta Q}{S_{\text{КЗ}}},$$

которые пропорциональны набросу мощности реактивной нагрузки ΔQ и обратно пропорциональны $S_{\text{КЗ}}$;

– колебания частоты

$$\Delta f = \frac{\frac{\Delta P}{\Delta t}}{2\pi S_{\text{КЗ}}},$$

которые пропорциональны скорости наброса активной мощности.

5. По стоимости дополнительных мероприятий для улучшения требуемых характеристик переходного процесса.

Значения токов КЗ могут иметь такие значения, что без их ограничения обойтись нельзя. Это потребует дополнительных капитальных вложений. Как видно, показатели качества переходных процессов по-разному характеризуют условия функционирования систем электроснабжения и электроприемников.

С точки зрения снижения стоимости элементов систем электроснабжения и облегчения условий их работы желательно уменьшить уровни токов КЗ и мощности $S_{\text{КЗ}}$, а с точки зрения качества электроэнергии у электроприемников необходим их высокий уровень.

24. СПОСОБЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Реализация различных способов ограничения токов КЗ предусматривает применение специальных технических средств, а так же принятие при проектировании и эксплуатации решений о структуре схем соединения элементов электроустановки.

Специальные технические средства, благодаря своему конструктивному исполнению, ограничивают значение или продолжительность воздействия тока КЗ.

К таким устройствам относятся:

- аппараты и устройства, реализующие автоматическое деление сети;
- силовые трансформаторы и автотрансформаторы с особым исполнением конструкции и соединения обмоток;
- токоограничивающие элементы и устройства;
- токоограничивающие коммутационные аппараты;
- устройства изменения режима работы нейтрали силовых трансформаторов.

Автоматическое деление сети реализуется с применением устройств противоаварийной автоматики и коммутационных аппаратов, устанавливаемых на мощных присоединениях (рис. 24.1).

При КЗ в точке K отключаются в первую очередь B_3 и B_2 , а затем B_1 .

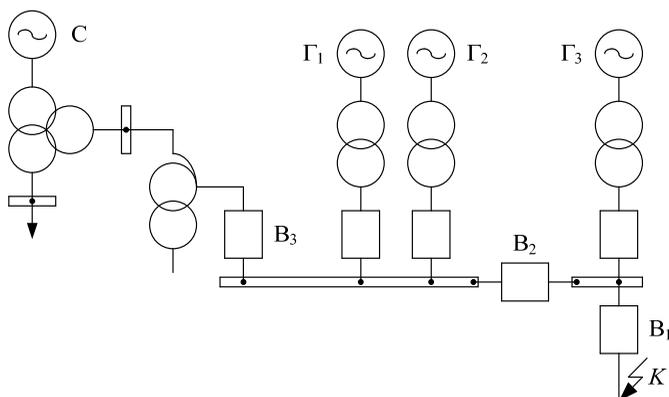


Рис. 24.1

Силовые трансформаторы могут выполняться с расщепленными обмотками низшего напряжения. Ограничение тока КЗ достигается большим значением u_k между частями расщепленной обмотки. Токи несимметричных КЗ зависят от схем соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов.

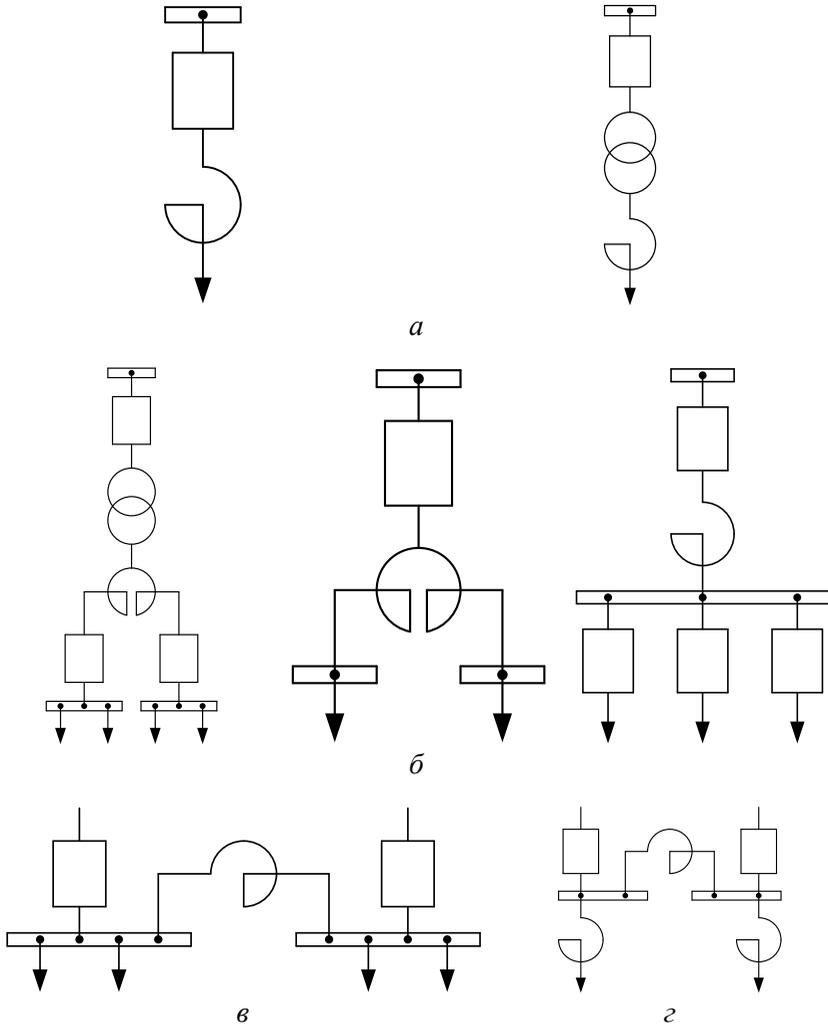


Рис. 24.2

Токоограничивающие реакторы представляют собой реактивные сопротивления и предназначены для снижения тока КЗ за реактором и сохранения требуемого уровня остаточного напряжения в узловых точках сети перед реактором.

В зависимости от места включения реакторов различают реактированные присоединения (рис. 24.2, *а*), вводов (рис. 24.2, *б*), секций (рис. 24.2, *в*) – и их сочетания (рис. 24.2, *г*).

Токоограничивающие коммутационные аппараты совмещают функции ограничения наибольших значений токов КЗ и защиты от воздействия сверхтоков на электроустановки путем их отключения.

К ним относятся быстродействующие токоограничивающие предохранители, ограничители ударного тока.

Изменяя режим работы нейтрали силовых трансформаторов, можно существенно изменить значения токов КЗ при несимметричных КЗ (рис. 24.3).

Для ограничения токов КЗ на землю разземляют нейтраль части силовых трансформаторов (рис. 24.3, *а*), включают в цепь нейтрали элементов сети реакторы с линейной характеристикой (рис. 24.3, *б*), насыщающиеся реакторы (рис. 24.3, *в*), дугогасящие реакторы и резисторы (рис. 24.3, *г*), нелинейные сопротивления (рис. 24.3, *д*).

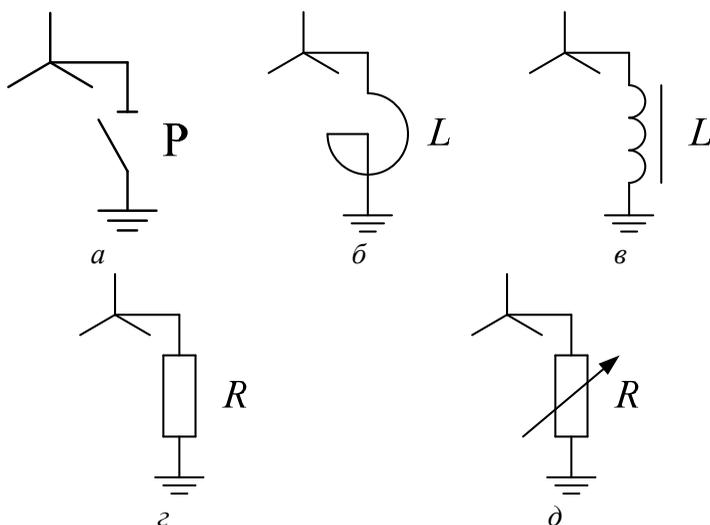


Рис. 24.3

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебник / С. А. Ульянов. – Москва: Энергия, 1970. – 520 с.

2. Ульянов, С. А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электроэнергетических системах : учебное пособие для вузов / С. А. Ульянов. – Москва: Энергия, 1968. – 496 с.

3. Переходные процессы в системах электроснабжения : учебник для вузов / Г. Г. Пивняк [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, Днепропетровск : Национальный горный университет, 2003. – 548 с.

4. Силюк С. М. Электромагнитные переходные процессы : учебное пособие для вузов / С. М. Силюк, Л. Н. Свита. – Минск: Технопринт, 2000. – 262 с.

5. Силюк С. М. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : методическое пособие к курсовой работе по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение», 1-53 01 04 «Автоматизация и управление энергетическими процессами» дневной и заочной форм обучения / С. М. Силюк, Л. Н. Свита. – Минск: БНТУ, 2004. – 103 с.

6. Сборник задач по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-53 01 04 «Автоматизация и управление энергетическими процессами» специализации 1-53 01 04 03 «Автоматизация и релейная защита электроустановок» / сост.: С. М. Силюк, В. А. Булат, Е. В. Булойчик. – Минск: БНТУ, 2010. – 71 с.

7. Евминов, Л. И. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебное пособие / Л. И. Евминов, Г. И. Селиверстов ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 418 с.

8. Крючков, И. П. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебное пособие для вузов / И. П. Крючков. – Москва: Изд-во МЭИ, 2000. – 168 с.

9. Методы расчета токов короткого замыкания. Сборник задач: учебное пособие по курсу «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» / под ред. И. П. Крючкова. – Москва: Изд-во МЭИ, 2000. – 59 с.

10. Переходные процессы в электроэнергетических системах : учебное пособие для вузов / И. П. Крючков [и др.]; под ред. И. П. Крючкова. – 2-е изд., стер. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2009. – 414 с.

11. Короткие замыкания и несимметричные режимы электроустановок : учебное пособие для вузов по специальностям «Электрические станции», «Электроснабжение» направления «Электроэнергетика» / И. П. Крючков [и др.]. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2008. – 472 с.

12. Щедрин, В. А. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учебное пособие / В. А. Щедрин. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. Ун-та, 2007. – 422 с.

13. Методические указания по расчету токов короткого замыкания в сети напряжением до 1 кВ электрических станций и подстанций с учетом влияния электрической дуги: СТП 09110.20.145–07. – Введ. 02.04.2007. – Минск: ГПО «Белэнерго», 2007. – 60 с.

14. Жуков, В. В. Короткие замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ / В. В. Жуков. – Москва: Изд-во МЭИ, 2004. – 192 с.

15. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ: ГОСТ 27514–87. – Введ. 01.01.1989. – Москва: Издательство стандартов, 1989. – 40 с.

16. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ: ГОСТ Р 52735–2007. – Введ. 01.07.2008. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 35 с.

17. Короткие замыкания и выбор электрооборудования : учебное пособие для вузов / И. П. Крючков [и др.]; под ред. И. П. Крючкова, В. А. Старшинова. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2012. – 568 с.

Учебное издание

БУЛАТ Валерий Александрович
ГУБАНОВИЧ Анатолий Григорьевич
СИЛЮК Степан Макарович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Пособие для студентов специальностей
1-43 01 01 «Электрические станции»,
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
и 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

Редактор *В. И. Акуленок*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 10.01.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 12,50. Уч.-изд. л. 9,77. Тираж 150. Заказ 1044.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

