

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В.И. Готман

**КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ
И НЕСИММЕТРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*Допущено УМО по образованию в области энергетики
и электротехники в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
140200 «Электроэнергетика»*

Издательство
Томского политехнического университета
2011

УДК 621.311.014(075.8)

ББК 31.27-01я73

Г73

Готман В.И.

Г73

Короткие замыкания и несимметричные режимы в электроэнергетических системах: учебное пособие / В.И. Готман; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 240 с.

ISBN 978-5-98298-848-5

В пособии рассматриваются вопросы анализа и расчета электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах и системах электроснабжения; обосновываются параметры силовых элементов энергосистемы и их схемы замещения; даны методы расчета режимов короткого замыкания и продольной несимметрии; обсуждаются технические мероприятия по ограничению токов короткого замыкания; приведены числовые примеры.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.311.014(075.8)

ББК 31.27-01я73

Рецензенты

Доктор технических наук
профессор, заведующий кафедрой
электроэнергетических систем и электротехники
Новосибирской академии водного транспорта

В.П. Горелов

Кандидат технических наук, доцент
директор филиала ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири

А.В. Пахомов

ISBN 978-5-98298-848-5

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2011

© Готман В.И., 2011

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	6
Введение.....	8
Глава 1. Общие сведения об электромагнитных переходных процессах.....	10
1.1. Основные понятия и определения	10
1.2. Причины возникновения и последствия коротких замыканий	13
1.3. Назначение расчетов коротких замыканий и общие сведения о расчетных условиях	14
Контрольные вопросы.....	15
Глава 2. Общие указания к расчетам токов КЗ	16
2.1. Основные допущения при расчетах переходных процессов	16
2.2. Расчет параметров схем замещения	16
2.2.1. Система относительных единиц.....	17
2.2.2. Приведение параметров схемы к основной ступени напряжения.....	19
2.3. Преобразование схем замещения	33
Контрольные вопросы.....	34
Глава 3. Трехфазное короткое замыкание в электрической сети.....	35
3.1. Трехфазное КЗ в простейшей цепи, питаемой шинами неизменного напряжения	35
3.2. Действующее значение тока короткого замыкания.....	41
Контрольные вопросы.....	42
Глава 4. Параметры и режимы электрических машин	43
4.1. Режимные состояния машин	43
4.2. Схема замещения и параметры синхронной машины в установившемся режиме	43
4.3. Переходные ЭДС и реактивности синхронной машины.....	47
4.4. Сверхпереходные ЭДС и реактивности синхронной машины.....	54
4.5. Уравнения переходного процесса синхронной машины.....	58
4.6. Переходный процесс синхронного генератора при трехфазном КЗ.....	65
4.7. Гашение магнитного поля системы возбуждения генератора.....	75
4.8. Влияние автоматического регулирования возбуждения генератора при коротком замыкании	76

4.9. Установившийся режим КЗ.....	84
4.10. Влияние двигательной нагрузки	
на переходный процесс	86
4.10.1. Общие замечания	86
4.10.2. Синхронные двигатели и компенсаторы	86
4.10.3. Асинхронные двигатели и обобщенная нагрузка	90
Контрольные вопросы.....	93
Глава 5. Практические методы расчета токов	
трехфазного короткого замыкания	94
5.1. Учет питающей системы и коэффициенты	
токораспределения	94
5.2. Расчет начальных параметров трехфазного	
короткого замыкания.....	97
5.3. Расчет периодической слагаемой тока короткого	
замыкания в произвольный момент времени.....	102
Контрольные вопросы.....	117
Глава 6. Параметры элементов для токов обратной	
и нулевой последовательностей	118
6.1. Метод симметричных составляющих	118
6.2. Сопротивления обратной и нулевой	
последовательностей для элементов	
электрической системы	122
6.2.1. Синхронные машины.....	122
6.2.2. Асинхронные двигатели и обобщенная нагрузка	123
6.2.3. Трансформаторы и автотрансформаторы	124
6.2.4. Воздушные и кабельные линии	130
6.3. Схемы замещения прямой, обратной	
и нулевой последовательностей	134
Контрольные вопросы.....	138
Глава 7. Несимметричные короткие замыкания.....	139
7.1. Общие замечания	139
7.2. Двухфазное короткое замыкание.....	140
7.3. Однофазное короткое замыкание	143
7.4. Двухфазное короткое замыкание на землю	145
7.5. Обобщенные выражения для несимметричных	
коротких замыканий	149
7.6. Сравнение токов различных видов	
короткого замыкания.....	150
7.7. Комплексные схемы замещения	152

7.8. Распределение и трансформация симметричных составляющих токов и напряжений в электрической системе	155
7.9. Алгоритм расчета несимметричных коротких замыканий.....	161
Контрольные вопросы.....	177
Глава 8. Однократная продольная несимметрия и сложные виды повреждений.....	178
8.1. Общие замечания	178
8.2. Разрыв одной фазы.....	179
8.3. Разрыв двух фаз.....	182
8.4. Несимметрия от включения сопротивлений	184
8.5. Двойное замыкание на землю	194
8.6. Однофазное КЗ с разрывом фазы	201
Контрольные вопросы.....	204
Глава 9. Замыкания в сетях с изолированной нейтралью и электроустановках до 1 кВ.....	205
9.1. Общие замечания	205
9.2 Однофазное замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью	206
9.3. Компенсация емкостного тока простого замыкания	210
9.4. Расчет токов короткого замыкания в установках до 1000 В.....	213
Контрольные вопросы.....	218
Глава 10. Ограничение токов короткого замыкания	219
10.1. Постановка задачи.....	219
10.2. Оптимизация структуры сети (схемные решения).....	220
10.3. Стационарное или автоматическое деление сети.....	222
10.4. Токоограничивающие устройства	223
10.5. Оптимизация режима заземления нейтралей в электрических сетях.....	227
10.6. Координация уровней токов КЗ.....	228
Контрольные вопросы.....	234
Список литературы	235
Приложение. Справочные данные по расчету токов в установках до 1000 В.....	236

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие отражает содержание курса «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

Основная часть настоящего пособия представляет переработку ранее изданного пособия [2], которая осуществлена с учетом многолетнего опыта преподавания автора в Томском политехническом университете. С одной стороны, произведено сокращение материала по анализу переходных процессов в сети с синхронными генераторами. Методика расчета периодической слагаемой тока короткого замыкания для произвольного момента времени по расчетным кривым, разработанным в 1940 г., сориентирована на типовые кривые 1975 г. С другой стороны, введен новый материал, отражающий сложные виды повреждений, замыкания в сетях с изолированной нейтралью, процессы в электроустановках до 1 кВ и средства ограничения токов короткого замыкания. Учтены результаты научных исследований в области электромагнитных переходных процессов, а также нормативно-технические документы последних лет.

Автор стремился изложить материал компактно, логично, а все принципиальные вопросы и методы расчета проиллюстрировать необходимым количеством примеров с обсуждением хода решения и результатов.

Материал пособия разбит на десять глав. Дано описание причин возникновения коротких замыканий и их последствий, приведен перечень задач, основанных на расчетах режимов коротких замыканий. Рассмотрены электромагнитные переходные процессы в синхронных генераторах и простейших электрических системах, обоснованы параметры синхронных и асинхронных машин в переходном режиме, даны инженерные методы расчета основных параметров режима при симметричных и несимметричных коротких замыканиях и продольной несимметрии. Описаны особенности подготовки схем замещения и расчет их параметров. Содержание пособия не может быть полностью изложено на лекциях. Поэтому материал гл. 2 «Общие указания к расчетам токов КЗ» в основном прорабатывается на практических занятиях, а разд. 8.5, 8.6 предназначены для развития общей эрудиции учащихся. Гл. 10 «Ограничение токов короткого замыкания», носящую описательный характер, как правило, выносят на самостоятельное изучение.

Приведенный в конце список литературы ориентирован на студентов, увлеченных предметом, и указывает на фундаментальные работы по рассматриваемой дисциплине.

Автор выражает свою признательность студентам Энергетического института ТПУ Д. Рюмину и Е. Пугачевой за компьютерную верстку учебного пособия.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетическая система является совокупностью устройств, связанных одновременностью процесса производства, распределения и потребления электрической энергии. Одновременность этих процессов налагает на персонал и системную автоматику особые требования по качественному управлению энергосистемами с целью обеспечения бесперебойного энергоснабжения потребителей. Это относится как к нормальным (установившимся), так и переходным (неустановившимся) режимам работы электроэнергетических систем.

Под переходными режимами понимаются неустановившиеся состояния, причиной которых являются разного рода воздействия. Эти воздействия можно классифицировать на малые и кратковременные (толчки нагрузки) или сильные и длительные (короткие замыкания, сбросы и наборы мощности, отключение линий и трансформаторов и т. д.). Непрерывный рост электро- и энергопотребления, развитие электроэнергетических систем по единичной мощности агрегатов, увеличение напряжений и протяженности являются причинами повышения роли переходных процессов. В настоящее время управление последними в электрических системах представляется столь же важной задачей, как и управление нормальными режимами.

Наиболее сильными возмущающими воздействиями являются всевозможные виды коротких замыканий. В электрических системах они вызываются повреждением фазовой или линейной изоляции токоведущих частей вследствие прямых ударов молнии, недопустимых ветровых и гололедных нагрузок, естественного старения изоляции, механических повреждений кабелей при земляных работах и т. д.

Короткие замыкания сопровождаются увеличением токов в окрестности поврежденного участка и снижением напряжений. Уменьшение напряжения приводит к расстройству нормальной работы электроприемников, перегрузке или остановке двигателей, а при коротких замыканиях в системообразующих связях – к нарушению устойчивости параллельной работы отдельных станций. В результате этого система распадается на группы несинхронно работающих станций, что представляет весьма тяжелую системную аварию. Возрастание величины токов короткого замыкания может приводить к значительным электродинамическим (механическим) усилиям и термическим повреждениям элементов электроустановок. В связи с этим при проектировании и эксплуатации электрических установок необходимо так выбрать оборудование и наладить режим работы этих установок, чтобы оно надежно работало не

только в нормальных, но и в аварийных режимах. Решению данных задач помогают теоретические исследования и практические расчеты, особенно расчеты параметров режимов коротких замыканий.

Систематические разработки теории переходных процессов в электрических системах начались в конце 20-х гг. прошлого столетия. В 1929 г. Р. Парк и независимо от него в 1933 г. А.А. Горев разработали основы строгой теории переходных процессов синхронных машин в виде системы дифференциальных уравнений. В начале 30-х гг. Р. Эванс и К. Вагнер предложили использование метода симметричных составляющих для анализа несимметричных режимов. Эти работы послужили известным толчком к быстрому развитию исследований в области переходных процессов в электрических системах как в России, так и за рубежом.

Существенный вклад в теорию и практику электромагнитных переходных процессов внесли как российские ученые-энергетики (А.А. Горев, Н.Н. Щедрин, Н.Ф. Марголин, Л.Г. Мамиконянц, А.Б. Чернин, С.А. Ульянов), так и зарубежные (Р. Рюденберг, Р. Парк, К. Вагнер, Р. Эванс, Э. Кларк, Э. Кимбарк).

Определенные этапы эволюции можно отметить и в практике расчета режимов коротких замыканий в энергосистемах и проектных организациях. По мере развития энергетических систем и их объединений существенно усложнились и увеличились объемы вычислений. В 50–60-х гг. широкое применение для этих целей получили расчетные статические модели постоянного и переменного тока. С 70-х гг. в качестве основных средств для расчетов стали использоваться цифровые вычислительные машины и специализированное программное обеспечение.

В заключение хотелось бы отметить особую роль профессора Московского энергетического института А.С. Ульянова в становлении учебной дисциплины «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» в вузах России. Его учебник [1] и монография [11] до сих пор пользуются читательским спросом.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

1.1. Основные понятия и определения

Электрическая система – это условно выделенная часть электроэнергетической системы, в которой осуществляется процесс выработки, преобразования, передачи и потребления электрической энергии. Совокупность упомянутых процессов, характеризующих состояние электрической системы в любой момент времени, принято называть режимом работы системы. Режим (состояние) характеризуется напряжениями, токами, мощностями, фазовыми углами и т. д., которые связаны между собой параметрами системы. К последним относятся сопротивления, проводимости, коэффициенты трансформации, постоянные времени и т. п. – определяются физическими свойствами элементов.

Различают несколько видов режимов работы электрической системы (ЭС):

1. *Установившийся (нормальный) режим* – состояние системы, когда параметры режима изменяются в небольших пределах, что позволяет их считать условно постоянными. По этой причине в энергетической литературе такой режим называют *квазиустановившимся*.

2. *Нормальный переходный режим* имеет место при нормальной эксплуатации системы (изменения нагрузки, коммутационные переключения и т. д.).

3. *Аварийный переходный режим* возникает при значительных возмущениях (авариях) в электрической системе, например, при коротком замыкании, внезапном отключении или включении мощных элементов, несинхронном включении синхронных машин (СМ) и т. д.

4. *Послеаварийный установившийся режим* наступает после отключения поврежденных элементов ЭС. При этом параметры послеаварийного режима могут быть как близкими к параметрам предшествующего (нормального) режима, так и значительно отличаться от них.

При переходе от одного режима к другому изменяется электромагнитное состояние элементов системы и нарушается баланс между механическими и электромагнитными моментами на валах генераторов и двигателей. Это означает, что переходный процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и электромеханических изменений в системе, которые взаимно связаны и представляют собой единое целое. Тем не менее очень часто переходный процесс делят на две стадии.

На первой стадии из-за большой инерции вращающихся машин в ЭС преобладают электромагнитные изменения. Эта стадия длится от нескольких сотых до 0,1–0,2 с и называется *электромагнитным переходным процессом*. На второй стадии проявляются механические свойства системы, которые оказывают существенное влияние на переходные процессы. Эта стадия называется *электромеханическим переходным процессом*.

Наиболее частой причиной возникновения аварийных переходных процессов являются короткие замыкания (КЗ). В трехфазных системах с глухозаземленной нейтралью ($U = 0,4; 110$ кВ и выше) различают следующие виды коротких замыканий в одной точке (см. табл. 1.1):

- *трехфазное;*
- *однофазное;*
- *двухфазное;*
- *двухфазное на землю*, т. е. замыкание между двумя фазами с одновременным замыканием той же точки на землю.

В сетях с изолированной или компенсированной нейтралью ($U = 3; 6; 10; 35$ кВ) замыкание одной фазы на землю называется простым.

В месте КЗ может возникать переходное сопротивление, вызванное электрической дугой, загрязнением, наличием остатков изоляции и т. д. Это сопротивление минимально в начальной стадии переходного процесса, когда ток в дуге достигает наибольшего значения, а длина дуги, напротив, наименьшего. С течением времени сопротивление дуги быстро возрастает. В силу неопределенности данных о величине переходного сопротивления его учет весьма осложнен. Для получения максимально возможных токов переходным сопротивлением пренебрегают и расчет производят для металлических КЗ.

Несимметричные КЗ образуют в системе *поперечную несимметрию*. Отключение (разрыв) одной или двух фаз какого-либо элемента системы (например, отключение одной фазы линии электропередачи) вызывает *продольную несимметрию*. Повреждения, сопровождающиеся многократной несимметрией (например, обрыв фазы и ее одновременное короткое замыкание), называются сложными.

Наибольшую вероятность имеют однофазные КЗ; при этом она возрастает с увеличением класса напряжения сети. Это обусловлено увеличением междуфазного расстояния (в среднем с 0,7 м в сети 6–10 кВ до 14 м в сети 500 кВ). Иногда в процессе развития аварии первоначальный вид короткого замыкания переходит в другой (например, однофазное КЗ – в двухфазное на землю).

Таблица 1.1

Вероятность коротких замыканий в электрических системах

Виды КЗ и их обозначения	Принципиальная схема	Относительная вероятность КЗ (%) в сетях различных напряжений, кВ				
		6–20	35	110	220	500
Трехфазное $K^{(3)}$		11	8	4	2	1
Двухфазное на землю $K^{(1.1)}$		11	7	8	7	2
Двухфазное $K^{(2)}$		17	18	5	3	2
Однофазное $K^{(1)}$		61	67	83	88	95

Наименьшую вероятность имеет трехфазное КЗ. Однако во многих случаях трехфазное КЗ связано с наиболее тяжелыми последствиями, поскольку оно вызывает наибольшие значения небалансов мощностей на валах генераторов. Трехфазное КЗ является симметричным, поскольку при нем все фазы находятся в одинаковых условиях. Изучение переходных процессов начинается с режима трехфазного замыкания в силу его относительной простоты по сравнению с другими видами несимметрии. С другой стороны, применение метода симметричных составляющих позволяет ток прямой последовательности любого несимметричного замыкания определить как ток трехфазного короткого замыкания в фиктивной точке, удаленной от реальной точки КЗ на дополнительное сопротивление.

1.2. Причины возникновения и последствия коротких замыканий

Причины возникновения КЗ весьма многообразны. Выделим те, которые имеют наибольшую вероятность:

1. Механическое повреждение воздушных линий, опор, вызванное ветровыми нагрузками или гололедными явлениями.

2. Нарушение изоляции электрооборудования, вызванное ее естественным старением или термическим разрушением (характерно для электродвигателей и кабельных линий).

3. Перекрытие изоляции вследствие прямых ударов молнии в провода воздушных линий или открытые распределительные устройства (ОРУ).

4. Ошибочные действия персонала подстанций при проведении оперативных переключений.

5. Перекрытие токоведущих частей животными и птицами.

Уменьшение количества КЗ в электрических системах напрямую связано с повышением качества электрооборудования, его монтажа и соблюдения правил технической эксплуатации электроустановок.

Прямым следствием коротких замыканий является снижение напряжения в узлах и увеличение токов. Этими двумя факторами в конечном итоге определяются многочисленные последствия режима КЗ. Выделим из них наиболее тяжелые и значимые:

1. Системная авария, вызванная нарушением устойчивости энергосистемы. Это наиболее опасное последствие КЗ, которое может приводить к разделению системы на автономные части, прекращению энергоснабжения ответственных электроприемников и влечет за собой значительный технико-экономический ущерб.

2. Термическое повреждение электрооборудования, связанное с его недопустимым перегревом токами КЗ.

3. Механическое повреждение электрооборудования, вызываемое воздействием больших электромагнитных сил между токоведущими частями.

4. Ухудшение устойчивой работы электроприемников. Момент вращения асинхронных двигателей (основного элемента электропривода) пропорционален квадрату питающего напряжения. При незначительных снижениях напряжения скорость двигателя уменьшается, что приводит к увеличению потребляемого тока и перегреву изоляции. При значительном снижении напряжения (до 60–70 % от номинального) происходит его аварийное отключение, что, в свою очередь, может вызвать нарушение технологического процесса (экономический ущерб).

5. Неблагоприятное воздействие на близлежащие линии связи и сигнализации. При несимметричных режимах в указанных линиях возникают индуцированные ЭДС, которые могут быть опасны для обслуживающего персонала и аппаратуры.

Наибольшая опасность при коротком замыкании угрожает элементам системы, прилегающим к месту его возникновения. В зависимости от места и продолжительности КЗ его последствия могут иметь местный характер (удаленное от источника питания КЗ) или отражаться на функционировании всей системы (при КЗ на системообразующих связях).

1.3. Назначение расчетов коротких замыканий и общие сведения о расчетных условиях

Короткие замыкания и продольная несимметрия оказывают неблагоприятное воздействие на электрооборудование и энергосистему в целом. Для предотвращения или уменьшения этого воздействия их необходимо учитывать как на стадии проектирования, так и эксплуатации энергосистем. Отметим наиболее типовые задачи, в решении которых необходимо учитывать режимы КЗ:

1. Анализ и оценка динамической устойчивости работы энергосистемы, разработка технических и режимных мероприятий для ее повышения.

2. Выбор аппаратов и проводников и их проверка по условиям термической и электродинамической стойкости.

3. Проектирование и настройка устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА).

4. Определение числа заземленных нейтралей трансформаторов и их размещение в электрической системе.

5. Выбор конструкции шинопроводов на большие рабочие токи.

6. Определение условий работы потребителей в аварийных режимах.

7. Проектирование защитных заземлений; выбор характеристик разрядников для защиты от перенапряжений.

Каждая из этих задач должна решаться при соответствующих расчетных условиях. *Под расчетными условиями понимают* выбор расчетной схемы, местоположение точек КЗ, вид короткого замыкания, расчетный момент времени и ряд других положений. Расчетные условия рассматриваются в совокупности с содержанием поставленной задачи и нормируются Руководящими указаниями по расчету режимов коротких замыканий.

Утяжеление расчетных условий может приводить к дополнительным затратам в системе электроснабжения, которые не будут окупаться в силу малой вероятности таких ситуаций. С другой стороны, легкие условия могут привести к перерывам электроснабжения. Поэтому выбор расчетных условий является комплексной технико-экономической задачей, которая решается и постоянно корректируется в соответствии с опытом проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем и условиями технической политики.

Так, например, в соответствии с Руководящими указаниями при выборе выключателя должны быть определены наибольшие величины токов короткого замыкания. С этой целью предполагают, что короткое замыкание происходит при работе максимально возможного числа генераторов; за расчетный вид короткого замыкания принимается тот, при котором достигается наибольшая величина тока КЗ.

Для решения ряда вопросов, связанных с выбором и настройкой устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем, часто приходится находить не наибольшие, а, напротив, наименьшие величины токов при коротких замыканиях. При этом, естественно, должны быть приняты совсем иные расчетные условия по сравнению с указанными выше.

Точность расчета КЗ зависит от его цели. Так, при выборе и проверке электрических аппаратов не требуется высокой точности расчета, потому что параметры аппаратов имеют дискретную шкалу. При выборе устройств релейной защиты и автоматики точность расчета должна быть значительно выше.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под режимом электрической системы? Какие основные виды режимов характерны для электрической системы и в чем их особенности?
2. Чем определяются основные параметры электрической системы и параметры ее режима? В чем их принципиальное отличие?
3. Какие виды КЗ возникают в электрических системах и какова относительная вероятность их возникновения?
4. Каковы наиболее тяжелые последствия коротких замыканий и в чем они проявляются?
5. Какие типовые задачи электроэнергетики требуют расчета режимов короткого замыкания?

Глава 2

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТАМ ТОКОВ КЗ

2.1. Основные допущения при расчетах переходных процессов

Расчет переходного процесса в электрической системе с учетом всех влияющих факторов – сложная и трудоемкая задача. Для ее упрощения прибегают к ряду допущений. Ниже приводится ряд основных допущений, используемых для решения практических задач:

1. Пренебрежение ветвью намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов. Исключение – трехстержневой трансформатор напряжением 0,4/6(10) кВ в схеме нулевой последовательности при соединении обмоток Y_0/Y .

2. Отсутствие насыщения магнитных систем, т. е. постоянство сопротивлений элементов схемы замещения.

3. Пренебрежение емкостными проводимостями линий. Исключение – сети 6, 10, 35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью при расчете однофазных КЗ.

4. Пренебрежение активными сопротивлениями. Исключение – кабельные линии, воздушные линии с относительно небольшим сечением проводов, сети напряжением до 1000 В.

5. Пренебрежение сдвигом векторов ЭДС по фазе.

Применение вычислительной техники для расчетов режимов КЗ позволяет отказаться от некоторых допущений (в частности, от № 3, 4, 5) и тем самым повысить точность расчетов.

2.2. Расчет параметров схем замещения

Расчет переходного режима электрической системы предполагает составление расчетной схемы замещения, в которой параметры ее элементов (ЭДС, сопротивления) принимаются в *именованных* или *относительных* единицах. При наличии в расчетной схеме трансформаторов целесообразно имеющиеся *магнитно связанные* цепи представить эквивалентными *электрически связанной цепи*. Электрическая схема замещения позволяет осуществлять ее преобразование. Переход от трансформаторных связей к электрическим основан на приведении параметров элементов к одной из имеющихся в схеме ступеней трансформации. Особенности расчета параметров схемы замещения (в *именованных* или *относительных* единицах) и посвящен настоящий раздел.

2.2.1. Система относительных единиц

Представление электрических и электромагнитных величин в относительных единицах широко применяется в теории электрических машин. Это обусловлено тем, что представление любой величины не в именованных, а в относительных единицах существенно упрощает теоретические выкладки и придает результатам обобщенный вид. Равным образом относительные единицы могут быть использованы в практических расчетах токов и остаточных напряжений при КЗ.

Под относительным значением какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, принятой за базисную. Следовательно, перед тем как представить какие-либо величины в относительных единицах, надо выбрать *базисные единицы*.

Базисных электрических единиц четыре: мощность, напряжение, ток, сопротивление ($S_{\text{б}}$, $U_{\text{б}}$, $I_{\text{б}}$, $Z_{\text{б}}$). Однако только две (любые) из этих четырех являются независимыми, т. е. могут быть приняты произвольным образом. С практической точки зрения наиболее целесообразно в качестве независимых базисных единиц принять $S_{\text{б}}$ и $U_{\text{б}}$.

Тогда две другие (зависимые) определяются из соотношения мощности для трехфазной цепи и закона Ома:

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{б}}}; \quad (2.1)$$

$$Z_{\text{б}} = \frac{U_{\text{б}}}{\sqrt{3}I_{\text{б}}} = \frac{U_{\text{б}}^2}{S_{\text{б}}}. \quad (2.2)$$

Для произвольных именованных величин – мощности, напряжения, тока и сопротивления (S , U , I , Z) – относительные значения при выбранных базисных условиях следует вычислять по формулам:

$$S_{*\text{б}} = S/S_{\text{б}}; \quad (2.3)$$

$$U_{*\text{б}} = U/U_{\text{б}}; \quad (2.4)$$

$$I_{*\text{б}} = I/I_{\text{б}}; \quad (2.5)$$

$$Z_{*\text{б}} = Z/Z_{\text{б}}, \quad (2.6)$$

где приняты следующие символы: * – величина выражена в относительных единицах; б – величина приведена к базисным условиям.

Практически относительное сопротивление целесообразно вычислять так:

$$Z_{*\text{б}} = Z/Z_{\text{б}} = \frac{Z\sqrt{3}I_{\text{б}}}{U_{\text{б}}} = \frac{ZS_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2}. \quad (2.7)$$

Отметим, что относительные фазные и междуфазные напряжения численно одинаковы; равным образом численно одинаковы относительные фазная мощность и мощность трех фаз, фазный и линейный токи.

Для ряда силовых элементов, таких как генератор, трансформатор, двигатель, токоограничивающий реактор, в паспортных данных сопротивления приведены не в именованных единицах, а в процентах или относительных единицах. При этом в качестве базисных единиц приняты номинальные параметры этих элементов – $S_{\text{НОМ}}$, $U_{\text{НОМ}}$, $I_{\text{НОМ}}$. В этом случае пересчет сопротивления, данного в относительных номинальных единицах, к произвольно выбранным базисным условиям производится по следующему выражению:

$$Z_{*\delta} = Z_{*\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}} I_{\delta}}{I_{\text{НОМ}} U_{\delta}} = Z_{*\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2 S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}} U_{\delta}^2}. \quad (2.8)$$

Систему относительных единиц можно распространить на любые физические величины. Рассмотрим относительные значения ряда электромагнитных и физических параметров, которые используются в дальнейшем.

Время. За базисную единицу времени принимается время, за которое ротор электрической машины повернется на один электрический радиан при синхронной скорости вращения ω_0 , т. е. $t_{\delta} = 1/\omega_0$. Следовательно, время t в относительных единицах, при принятом базисе, нужно вычислять так:

$$t_{*\delta} = t/t_{\delta} = \omega_0 t \text{ и при } f = 50 \text{ Гц } t_{*\delta} = 314t. \quad (2.9)$$

В частном случае постоянная времени активно-индуктивного контура в относительных единицах выражается формулой

$$T_{*\delta} = \omega_0 T = \omega_0 \frac{L}{R} = \frac{x}{R} = \frac{x_{*\delta}}{R_{*\delta}}. \quad (2.10)$$

Угол поворота ротора (или угол рассогласования векторов напряжений (δ)) может выражаться как в градусах, так и в относительных единицах (радианах), которые имеют следующую связь:

$$\delta_{\text{рад}} = \frac{\pi}{180^\circ} \delta^\circ.$$

Скорость. За единицу измерения угловой скорости принимают синхронную скорость $\omega_{\delta} = \omega_0$, тогда

$$\omega_{*\delta} = \frac{\omega}{\omega_{\delta}} = \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (2.11)$$

В соответствии с этим в качестве базисных единиц принимают:

$$\text{для индуктивности } L_{\sigma} = \frac{Z_{\sigma}}{\omega_{\sigma}} = \frac{Z_{\sigma}}{\omega_0}; \quad (2.12)$$

$$\text{для потокосцепления } \Psi_{\sigma} = \frac{U_{\sigma}}{\omega_{\sigma}} = \frac{U_{\sigma}}{\omega_0}. \quad (2.13)$$

Следовательно, при принятых базисных единицах и сохранении угловой скорости неизменной и равной синхронной ($\omega_{*0} = 1$) получим, что индуктивное сопротивление численно равно индуктивности; потокосцепление – ЭДС. Действительно,

$$\left. \begin{aligned} x_{*\sigma} &= \omega_{*0} L_{*\sigma} = L_{*\sigma}; \\ \Psi_{*\sigma} &= I_{*\sigma} L_{*\sigma} = I_{*\sigma} x_{*\sigma}; \\ E_{*\sigma} &= \omega_{*0} \Psi_{*\sigma} = \Psi_{*\sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Возможность замены одних относительных величин другими – существенное достоинство системы относительных единиц.

2.2.2. Приведение параметров схемы к основной ступени напряжения

Расчетная схема энергосистемы содержит трансформаторные связи. Для создания эквивалентной электрической схемы замещения необходимо освободиться от трансформаторных связей, т. е. сопротивления и ЭДС схемы, находящиеся на разных ступенях трансформации, требуется привести к одной ступени, принятой за основную. Это приведение осуществляется по следующим соотношениям:

$$\bar{E} = (k_1 k_2 \dots k_n) E; \quad (2.15)$$

$$\bar{I} = \frac{1}{(k_1 k_2 \dots k_n)} I; \quad (2.16)$$

$$\bar{Z} = (k_1 k_2 \dots k_n)^2 Z, \quad (2.17)$$

где k_1, k_2, \dots, k_n – коэффициенты трансформации, через них величины (E, I, Z), подлежащие приведению, связаны со ступенью, к которой осуществляется приведение. Здесь под коэффициентом трансформации k трансформатора или автотрансформатора понимают отношение междуфазных напряжений холостого хода его обмоток в направлении от ступени, к которой осуществляется приведение параметров, к той ступени, на которой находятся величины, подлежащие приведению. При этом коэффициенты k_i могут быть больше или меньше единицы.

Приведение параметров в именованных единицах

Применение формулы (2.17) предполагает знание сопротивлений элементов схемы в Омах, приведенных к своим ступеням трансформации. Для элементов (генераторов, трансформаторов, реакторов), сопротивления которых представлены в относительных номинальных единицах, расчет сопротивлений в Омах осуществляют по выражению

$$Z = Z_{*НОМ} Z_{НОМ} = Z_{*НОМ} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = Z_{*НОМ} \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}I_{НОМ}}. \quad (2.18)$$

В качестве основной ступени приведения целесообразно принимать ступень КЗ. Для схемы на рис. 2.1 приведение сопротивлений некоторых элементов к ступени 1 (основной) напряжением 6 кВ осуществляется так:

- для генератора Г

$$\bar{x}_G = x_{*Г(НОМ)} \frac{U_{Г(НОМ)}^2}{S_{Г(НОМ)}} (k_1 k_2)^2 = x_{*Г(НОМ)} \frac{U_{Г(НОМ)}^2}{S_{Г(НОМ)}} \left(\frac{U_1 U_3}{U_2 U_4} \right)^2; \quad (2.19)$$

$$\bar{E}_G = E_G \left(\frac{U_1 U_3}{U_2 U_4} \right), \quad (2.20)$$

- для трансформатора Т2

$$\bar{x}_{T2} = \frac{U_K \% U_{(В)НОМ}^2}{100 S_{НОМ}} (k_1)^2 = \frac{U_K \% U_{(В)НОМ}^2}{100 S_{НОМ}} \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2, \quad (2.21)$$

- для линии L2

$$\bar{x}_L = x_0 l (k_1)^2 = x_0 l \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2. \quad (2.22)$$

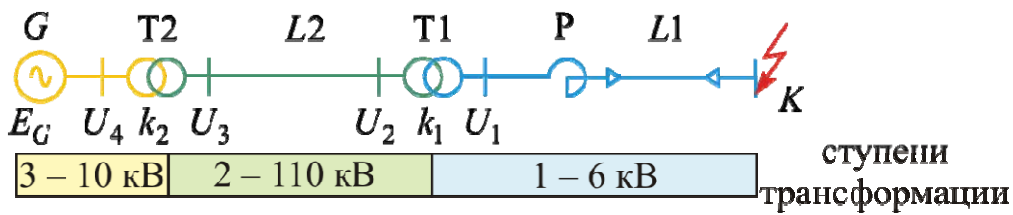


Рис. 2.1. Принципиальная схема с несколькими ступенями трансформации

Отметим, что силовые трансформаторы (автотрансформаторы) разделяют ступени напряжения, и в силу этого формально могут быть отнесены к любой ступени, с которой они соприкасаются. Так, трансформатор Т1 (рис. 2.1) может быть отнесен к ступени 2, если сопротивление определено по его номинальному напряжению высшей стороны (110 кВ),

и к ступени 1, если сопротивление определено по его номинальному напряжению низшей стороны (6 кВ).

Найденные для схемы замещения токи и напряжения являются реальными только для той части схемы, ступень напряжения которой принята в качестве основной. Истинные токи и напряжения на других ступенях схемы находятся обратным пересчетом по выражению (2.15) и (2.16).

Приведение параметров в относительных базисных единицах

При расчете параметров в относительных единицах целесообразно придерживаться определенной последовательности действий.

1. Пронумеровать ступени трансформации, принимая за первую – ступень КЗ. В сложной схеме разным номерам ступеней может соответствовать одно и то же номинальное напряжение.

2. Принять единую для всей схемы базисную мощность (S_{σ}). Для удобства вычислений принимают $S_{\sigma} = 100; 1000$ МВА. На ступени короткого замыкания принять базисное напряжение, равное действительному (рабочему) напряжению. Как правило, действительное напряжение нормального режима, который предшествовал КЗ, неизвестно. В этих условиях рекомендуется принять $U_{\sigma 1} = U_{\text{ном}}$, или $1,05U_{\text{ном}}$.

По известному значению $U_{\sigma 1}$ и коэффициентам трансформации k_i (см. формулу 2.15) рассчитать базисные напряжения для других ступеней. Применительно к схеме, изображенной на рис. 2.1, имеем:

$$U_{\sigma 2} = U_{\sigma 1} k'_1 = U_{\sigma 1} \frac{U_2}{U_1};$$

$$U_{\sigma 3} = U_{\sigma 1} (k'_1 k'_2) = U_{\sigma 1} \left(\frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{U_4}{U_3} \right) = U_{\sigma 2} \left(\frac{U_4}{U_3} \right). \quad (2.23)$$

При этом численные значения базисных напряжений должны быть близки к номинальным напряжениям соответствующих ступеней.

Базисный ток произвольной ступени определяется по выражению

$$I_{\sigma i} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma i}}. \quad (2.24)$$

3. По формулам (2.3)–(2.8) рассчитать в относительных базисных единицах все интересующие параметры. При этом в каждом из указанных выражений значения базисных единиц ($U_{\sigma}, I_{\sigma}, Z_{\sigma}$) и значения параметров, которые необходимо представить в относительных единицах, должны соответствовать одной и той же ступени трансформации.

Для параметров схемы на рис. 2.1 имеем:

$$x_{Г*б} = x_{Г*НОМ} \frac{U_{Г(НОМ)}^2 S_б}{S_{Г(НОМ)} U_{б3}^2}, \quad E_{Г*б} = \frac{E_Г}{U_{б3}}; \quad (2.25)$$

$$x_{Г2*б} = \frac{U_K \% U_{Г(В)НОМ}^2}{100 S_{НОМ}} \cdot \frac{S_б}{U_{б2}^2}, \quad x_{L2*б} = x_{0L} \frac{S_б}{U_{б2}^2}; \quad (2.26)$$

$$x_{Г1*б} = \frac{U_K \% U_{Г(Н)НОМ}^2}{100 S_{НОМ}} \cdot \frac{S_б}{U_{б1}^2}, \quad x_{P*б} = \frac{x_P \% U_{P(НОМ)}}{100} \frac{I_{б1}}{I_{P(НОМ)}} \frac{I_{б1}}{U_{б1}}. \quad (2.27)$$

В рассмотренном примере при определении $U_{бi}$ участвовали действительные коэффициенты трансформации, заданные в качестве исходных величин. Такое приведение называется *точным*.

В практических расчетах применяется *приближенное приведение параметров*, позволяющее упростить выражения и уменьшить объем вычислений. Приближенное приведение параметров основано на том, что для каждой ступени трансформации устанавливают *среднее номинальное напряжение* $U_{ср.НОМ i} \approx 1,05 U_{НОМ i}$, а именно:

$$0,23; 0,4; 0,69; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18,0; \\ 20,0; 24,0; 37,0; 115; 154; 230; 340; 515 \text{ (кВ)}. \quad (2.28)$$

При этом условно принимают, что номинальные напряжения всех элементов, находящихся на одной ступени, одинаковы и равны $U_{ср.}$ этой ступени. Коэффициенты трансформации трансформаторов в этом случае равны отношению $U_{(ВН)ср.}/U_{(НН)ср.}$, или $U_{(НН)ср.}/U_{(ВН)ср.}$. Благодаря принятому допущению в формулах для расчета относительных сопротивлений генераторов, трансформаторов, двигателей и реакторов базисное напряжение ступени и номинальное напряжение элемента сокращаются.

Обозначим последовательность действий при приближенном приведении параметров в относительных единицах.

1. Пронумеровать ступени трансформации, принимая ступень КЗ за первую.

2. Принять общую для всей схемы базисную мощность $S_б = 100; 1000$ МВА или иную удобную величину. Базисные напряжения ступеней ($U_{бi}$) принять согласно стандартному ряду (2.28); базисные токи вычислить по формуле (2.24).

3. Рассчитать относительные параметры элементов схемы замещения на базе выражений (2.25)–(2.27) с учетом принятых допущений.

Применительно к тестовой схеме, изображенной на рис. 2.1, согласно стандартному ряду (2.28) имеем следующие значения базисных напряжений: $U_{\delta 1} = 6,3$ кВ, $U_{\delta 2} = 115$ кВ, $U_{\delta 3} = 10,5$ кВ. С учетом принятого ранее допущения – о равенстве номинального напряжения силового элемента и базисного в пределах одной ступени трансформации – используем формулы приближенного приведения параметров для расчета сопротивлений:

- генератора –

$$x_{\Gamma*\delta} = x_{\Gamma*\text{ном}} \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma(\text{ном})}}, \quad E_{\Gamma*\delta} = \frac{E_{\Gamma}}{U_{\delta 3}};$$

- трансформаторов Т2, Т1 –

$$x_{T2*\delta} = \frac{U_K \% S_{\delta}}{100 S_{T2(\text{ном})}}, \quad x_{T1*\delta} = \frac{U_K \% S_{\delta}}{100 S_{T1(\text{ном})}};$$

- линий L2, L1 –

$$x_{L2*\delta} = x_0 l_2 \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 2}^2}, \quad R_{L1*\delta} = R_0 l_1 \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2}, \quad x_{L1*\delta} = x_0 l_1 \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2};$$

- реактора –

$$x_{P*\delta} = \frac{x_P \%}{100} \cdot \frac{I_{\delta 1}}{I_{P(\text{ном})}} \quad \text{при } U_{P(\text{ном})} = 6 \text{ кВ};$$

$$x_{P*\delta} = \frac{x_P \%}{100} \cdot \frac{U_{P(\text{ном})} I_{\delta 1}}{I_{P(\text{ном})} U_{\delta 1}} \quad \text{при } U_{P(\text{ном})} = 10 \text{ кВ}.$$

Если параметры схемы замещения были приняты в относительных единицах, то расчетные значения тока КЗ, мощности, остаточных напряжений также получаются в относительных единицах. Для их перевода в именованные единицы необходимо найденные относительные величины тока, мощности, напряжения умножить на соответствующие базисные единицы интересуемой ступени трансформации.

Отметим, что точность расчетов не зависит от используемой системы исчисления – именованной или относительной. Расчетные выражения для силовых элементов ЭС применительно к именованной и относительной системам исчисления сведены в табл. 2.1.

Пример 2.1. Для заданной схемы ЭС (рис. 2.2) осуществить точное и приближенное приведение параметров схемы в именованных и относительных единицах. Определить начальный сверхпереходный ток (действующее значение) при трехфазном КЗ, считая, что генератор

предварительно работал на холостом ходу с номинальным напряжением. Схема замещения для данного примера приведена на рис. 2.3.

Таблица 2.1

Расчетные выражения сопротивлений силовых элементов электрической системы при вычислении токов КЗ

Наименование элемента	Принципиальная схема	Схема замещения	Расчетные выражения сопротивлений	
			Именованные единицы	Относительные единицы (приближенное приведение)
Система			$x_C'' = \frac{U_{\text{ср.н}}^2}{S_{\text{кз}}''}$	$x_C'' = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{кз}}''}$
Синхронный генератор, синхронный двигатель			$x_d'' = x_d^{*H} \frac{U_H^2}{S_H}$	$x_d'' = x_d^{*H} \frac{S_{\text{б}}}{S_H}$
			$x_d = x_d^{*H} \frac{U_H^2}{S_H}$	$x_d = x_d^{*H} \frac{S_{\text{б}}}{S_H}$
Асинхронный двигатель			$x_M'' = \frac{U_H^2}{I_{\text{п}^*} S_H}$	$x_M'' = \frac{S_{\text{б}}}{I_{\text{п}^*} S_H}$
Обобщенная нагрузка			$x_H'' = 0.35 \frac{U_H^2}{S_H}$	$x_H'' = 0.35 \frac{S_{\text{б}}}{S_H}$
			$x_H = 1.2 \frac{U_H^2}{S_H}$	$x_H = 1.2 \frac{S_{\text{б}}}{S_H}$
Трансформатор			$x_T = \frac{U_K \% U_H^2}{100 S_H}$	$x_T = \frac{U_K \% S_{\text{б}}}{100 S_H}$
Реактор			$x_P = \frac{x_P \% U_H}{100 \sqrt{3} I_H}$	$x_P = \frac{x_P \% U_H I_{\text{б}}}{100 I_H U_{\text{б}}}$
Воздушная или кабельная линия			$R_L = r_0 l$ $x_L = x_0 l$	$R_L = r_0 l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2}$
				$x_L = x_0 l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2}$

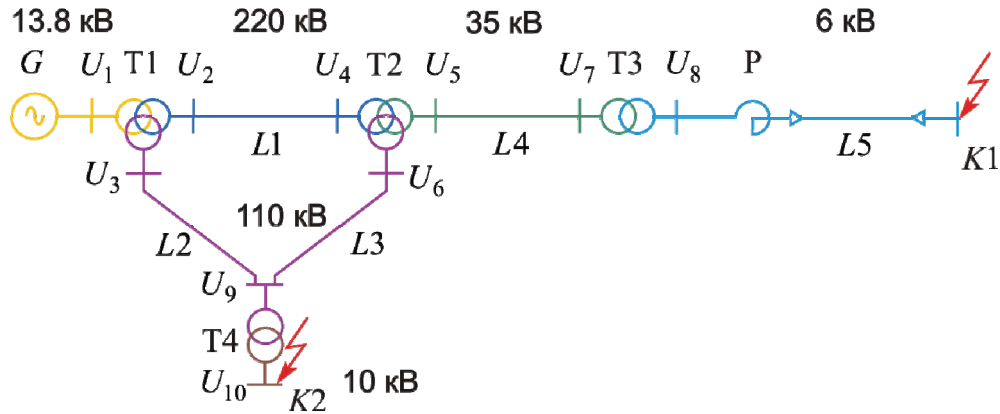


Рис. 2.2. Принципиальная схема ЭС (к примеру 2.1)

Параметры элементов схемы

Генератор Г: $S_{\text{НОМ}} = 150 \text{ МВА}$, $U_{\text{НОМ}} = 13,8 \text{ кВ}$, $x''_d = 0,2 \text{ о.е.}$

Трансформаторы:

T1: $S_{\text{НОМ}} = 120 \text{ МВА}$, $U_{\text{НОМ}} = 231/121/13,8 \text{ кВ}$, $U_{K(B-C)} = 11 \%$;

$U_{K(B-H)} = 17 \%$, $U_{K(C-H)} = 6 \%$;

T2: $S_{\text{НОМ}} = 90 \text{ МВА}$, $220/115/38,5 \text{ кВ}$, $U_{K(B-C)} = 12 \%$;

$U_{K(B-H)} = 20 \%$, $U_{K(C-H)} = 8 \%$;

T3: $S_{\text{НОМ}} = 20 \text{ МВА}$, $35/6,6 \text{ кВ}$, $U_K = 8 \%$;

T4: $S_{\text{НОМ}} = 60 \text{ МВА}$, $110/11 \text{ кВ}$, $U_K = 10,5 \%$.

Линии:

L1: $l = 120 \text{ км}$, $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$;

L2, L3: $l = 80 \text{ км}$, $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$;

L4: $l = 20 \text{ км}$, $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$;

L5 (кабель): $l = 3 \text{ км}$, $x_0 = 0,08 \text{ Ом/км}$, $R_0 = 0,45 \text{ Ом/км}$.

Реактор P: $U_{\text{НОМ}} = 10 \text{ кВ}$, $I_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ кА}$, $x = 4 \%$.

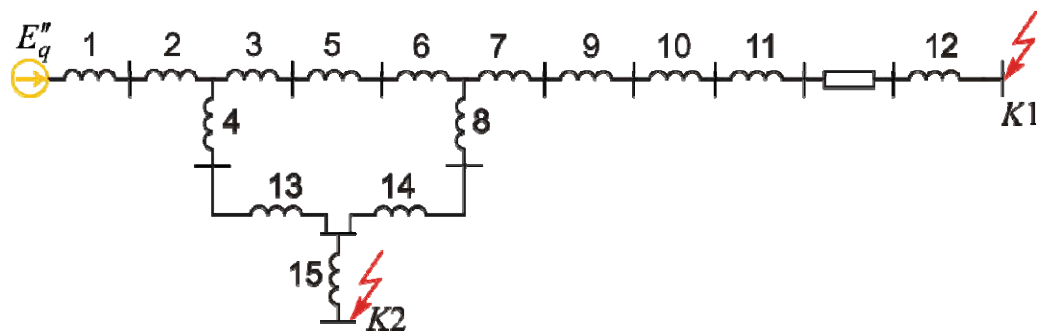


Рис. 2.3. Расчетная схема замещения

Решение

1. Точное приведение в именованных единицах

Примем за основную ступень сторону низкого напряжения трансформатора ТЗ ($U_{\text{осн}} = 6,6$ кВ). При учете действительных коэффициентов трансформации получим следующие приведенные сопротивления (см. рис. 2.3) в Омах:

$$x_1 = x_d'' \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} (k_{21} k_{54} k_{87})^2 = 0,2 \cdot \frac{13,8^2}{150} \cdot \left(\frac{231}{13,8} \cdot \frac{38,5}{220} \cdot \frac{6,6}{35} \right)^2 = 0,0775;$$

$$x_2 = \frac{U_{K(H)} U_{(B)\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ1}}} (k_{54} k_{87})^2 = \frac{6 \cdot 231^2}{100 \cdot 120} \cdot \left(\frac{38,5}{220} \cdot \frac{6,6}{35} \right)^2 = 0,0291,$$

где $U_{K(H)} = 0,5 [U_{K(B-H)} + U_{K(C-H)} - U_{K(B-C)}] = 0,5 \cdot (17 + 6 - 11) = 6 \%$;

$$x_3 = \frac{U_{K(B)} U_{\text{НОМ}(B)}^2}{100 S_{\text{НОМ1}}} (k_{54} k_{87})^2 = \frac{11 \cdot 231^2}{100 \cdot 120} \cdot \left(\frac{38,5}{220} \cdot \frac{6,6}{35} \right)^2 = 0,0533,$$

где $U_{K(B)} = 0,5 [U_{K(B-C)} + U_{K(B-H)} - U_{K(C-H)}] = 0,5 \cdot (11 + 17 - 6) = 11 \%$;

$$x_4 = \frac{U_{K(C)} U_{\text{НОМ}(B)}^2}{100 S_{\text{НОМ1}}} (k_{54} k_{87})^2 = 0,$$

где $U_{K(C)} = 0,5 (U_{K(B-C)} + U_{K(C-H)} - U_{K(B-H)}) = 0,5 \cdot (11 + 6 - 17) = 0$;

$$x_5 = x_0 l_1 (k_{54} k_{87})^2 = 0,4 \cdot 120 \cdot \left(\frac{38,5}{220} \cdot \frac{6,6}{35} \right)^2 = 0,0523;$$

$$x_6 = \frac{U_{K(B)} U_{(H)\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ2}}} (k_{87})^2 = \frac{12 \cdot 38,5^2}{100 \cdot 90} \cdot \left(\frac{6,6}{35} \right)^2 = 0,0703;$$

$$x_7 = 0,0468, \quad x_8 = 0;$$

$$x_9 = x_0 l_4 (k_{87})^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot \left(\frac{6,6}{35} \right)^2 = 0,2845;$$

$$x_{10} = \frac{U_K U_{(H)\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ3}}} = \frac{8 \cdot 6,6^2}{100 \cdot 20} = 0,1742;$$

$$x_{11} = \frac{x_p \% U_{\text{НОМ}}}{100 \sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} = \frac{4 \cdot 10}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,3} = 0,7707;$$

$$R_{12} = R_0 \cdot l_5 = 0,45 \cdot 3 = 1,35, \quad x_{12} = 0,08 \cdot 3 = 0,24;$$

$$x_{13} = x_{14} = x_0 I_2 (k_{56} k_{87})^2 = 0,4 \cdot 80 \cdot \left(\frac{38,5}{115} \cdot \frac{6,6}{35} \right)^2 = 0,1275;$$

$$x_{15} = \frac{U_K U_{(B)НОМ}^2}{100 S_{НОМ4}} (k_{56} k_{87})^2 = \frac{10,5 \cdot 110^2}{100 \cdot 60} \cdot \left(\frac{38,5}{115} \cdot \frac{6,6}{35} \right)^2 = 0,0844.$$

Фазная ЭДС и результирующие сопротивления до точки К1:

$$E_q'' = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} (k_{21} k_{54} k_{87}) = \frac{13,8}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{231}{13,8} \cdot \frac{38,5}{220} \cdot \frac{6,6}{35} \right) = 4,4064 \text{ кВ};$$

$$x_{1\Sigma} = x_1 + x_2 + (x_3 + x_5 + x_6) // (x_4 + x_{13} + x_{14} + x_8) + \\ + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} = 1,7269;$$

$$R_{1\Sigma} = R_{12} = 1,35, \quad Z_{1\Sigma} = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2} = 2,192.$$

Начальный ток в точке К1, приведенный к ступени К3 (6,6 кВ),

$$I_{K1}'' = \frac{E_q''}{Z_{1\Sigma}} = \frac{4,4061}{2,192} = 2,01 \text{ кА}.$$

Результирующее сопротивление схемы до точки К2

$$x_{2\Sigma} = x_1 + x_2 + (x_4 + x_{13}) // (x_3 + x_5 + x_6 + x_8 + x_{14}) + x_{15} = 0,28077.$$

Начальный сверхпереходный ток в точке К2, приведенный к ступени напряжения $U = 6,6$ кВ, составляет

$$I_{K2}'' = \frac{E_q''}{x_{2\Sigma}} = \frac{4,4061}{0,28077} = 15,693 \text{ кА},$$

а приведенный к ступени К3 (11 кВ), по выражению (2.16), –

$$\bar{I}_{K2}'' = I_{K2}'' \frac{1}{(k_{10,9} k_{65} k_{78})} = 15,693 \cdot \left(\frac{110}{11} \cdot \frac{38,5}{115} \cdot \frac{6,6}{35} \right) = 9,907 \text{ кА}.$$

2. Приближенное приведение в именованных единицах

В соответствии со шкалой средних номинальных напряжений (U_{cp}) ступеней трансформации для рассматриваемой схемы имеем:

$$U_1 = 13,8 \text{ кВ}, \quad U_2 = U_4 = 230 \text{ кВ}, \quad U_3 = U_6 = U_9 = 115 \text{ кВ};$$

$$U_5 = U_7 = 37 \text{ кВ}, \quad U_8 = 6,3 \text{ кВ}, \quad U_{10} = 10,5 \text{ кВ}.$$

Находим сопротивления элементов схемы, приведенные к ступени 6,3 кВ, в Омах:

$$x_1 = x_d'' \frac{U_{cp}^2}{S_{НОМ}} (k_{81})^2 = 0,2 \cdot \frac{13,8^2}{150} \cdot \left(\frac{6,3}{13,8} \right)^2 = 0,0529;$$

$$x_2 = \frac{U_{K(H)} U_{(B)cp.}^2}{100 S_{НОМ1}} (k_{82})^2 = \frac{6 \cdot 230^2}{100 \cdot 120} \cdot \left(\frac{6,3}{230}\right)^2 = 0,0198;$$

$$x_3 = \frac{U_{K(B)} U_{(B)cp.}^2}{100 S_{НОМ1}} (k_{82})^2 = \frac{11 \cdot 230^2}{100 \cdot 120} \cdot \left(\frac{6,3}{230}\right)^2 = 0,0364;$$

$$x_4 = 0, \quad x_5 = x_0 l_1 (k_{84})^2 = 0,4 \cdot 120 \cdot \left(\frac{6,3}{230}\right)^2 = 0,036;$$

$$x_6 = \frac{U_{K(B)} U_{cp.8}^2}{100 S_{НОМ2}} = \frac{12 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 90} = 0,053, \quad x_7 = \frac{U_{K(H)} U_{cp.8}^2}{100 S_{НОМ2}} = \frac{8 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 90} = 0,035;$$

$$x_8 = 0, \quad x_9 = 0,4 \cdot 20 \cdot \left(\frac{6,3}{37}\right)^2 = 0,232, \quad x_{10} = \frac{8 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 20} = 0,1588;$$

$$x_{11} = \frac{x_p \% U_{НОМ}}{100 \sqrt{3} I_{НОМ}} = \frac{4 \cdot 10}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,3} = 0,7707;$$

$$R_{12} = 0,45 \cdot 3 = 1,35, \quad x_{12} = 0,08 \cdot 3 = 0,24;$$

$$x_{13} = x_{14} = 0,4 \cdot 80 \cdot \left(\frac{6,3}{115}\right)^2 = 0,096, \quad x_{15} = \frac{10,5 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 60} = 0,0695.$$

Фазная ЭДС генератора

$$E_q'' = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} (k_{81}) = \frac{13,8}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{6,3}{13,8}\right) = 3,64 \text{ кВ}.$$

Находим результирующие сопротивления схемы до точек КЗ:

$$K1: R_{1\Sigma} = 1,35, \quad x_{1\Sigma} = 1,585, \quad Z_{1\Sigma} = 2,082 \text{ и } K2: x_{2\Sigma} = 0,2092.$$

Определяем начальный сверхпереходный ток в точке К1:

$$I_{K1}'' = \frac{E_q''}{Z_{1\Sigma}} = \frac{3,64}{2,082} = 1,75 \text{ кА}.$$

Начальный сверхпереходный ток в точке К2, приведенный к напряжению $U = 6,3$ кВ, составляет

$$I_{K2}'' = \frac{E_q''}{x_{2\Sigma}} = \frac{3,64}{0,2092} = 17,608 \text{ кА},$$

а приведенный к напряжению ступени КЗ (10,5 кВ), –

$$\bar{I}_{K2}'' = I_{K2}'' \frac{1}{k_{10,8}} = 17,608 \cdot \frac{6,3}{10,5} = 10,56 \text{ кА}.$$

3. Точное приведение в относительных единицах

3.1. Присвоим ступеням трансформации номера от 1 до 6, как показано в табл. 2.2.

Таблица 2.2

$U_{\text{ном}}$ (кВ) ступени	6	35	220	110	13,8	10
№ ступени	1	2	3	4	5	6
U_{δ} (кВ) ступени	6,6	35	200	104,5	11,95	10,45
I_{δ} (кА) ступени	87,58					55,3

За базисную мощность примем $S_{\delta} = 1000$ МВА, за базисное напряжение первой ступени – номинальное напряжение трансформатора ТЗ: $U_{\delta 1} = 6,6$ кВ. По соотношению (2.15) рассчитаем базисные напряжения других ступеней, используя заданные коэффициенты трансформации:

$$U_{\delta 2} = U_{\delta 1} k_{78} = 6,6 \cdot \frac{35}{6,6} = 35 \text{ кВ}, \quad U_{\delta 3} = U_{\delta 2} k_{45} = 35 \cdot \frac{220}{38,5} = 200 \text{ кВ};$$

$$U_{\delta 4} = U_{\delta 3} k_{64} = 200 \cdot \frac{115}{220} = 104,5 \text{ кВ}, \quad U_{\delta 5} = U_{\delta 3} k_{12} = 200 \cdot \frac{13,8}{231} = 11,95 \text{ кВ};$$

$$U_{\delta 6} = U_{\delta 4} k_{10,4} = 104,5 \cdot \frac{11}{110} = 10,45 \text{ кВ}.$$

Базисные токи определяем только для ступеней КЗ (кА):

$$I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta 1}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 87,58, \quad I_{\delta 6} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta 6}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,45} = 55,3.$$

Для удобства поместим полученные U_{δ} и I_{δ} в табл. 2.2.

3.2. Рассчитаем сопротивления элементов схемы замещения в относительных единицах для принятых базисных условий:

$$x_1 = x_d'' \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}} \left(\frac{U_{\Gamma(\text{ном})}}{U_{\delta 5}} \right)^2 = 0,2 \cdot \frac{1000}{150} \cdot \left(\frac{13,8}{11,95} \right)^2 = 1,778;$$

$$x_2 = \frac{U_{K(H)} S_{\delta}}{100 S_{\text{ном1}}} \left(\frac{U_{(B)\text{ном}}}{U_{\delta 3}} \right)^2 = \frac{6 \cdot 1000}{100 \cdot 120} \cdot \left(\frac{231}{200} \right)^2 = 0,667;$$

$$x_3 = \frac{U_{K(B)} S_{\delta}}{100 S_{\text{ном1}}} \left(\frac{U_{(B)\text{ном}}}{U_{\delta 3}} \right)^2 = \frac{11 \cdot 1000}{100 \cdot 120} \cdot \left(\frac{231}{200} \right)^2 = 1,223;$$

$$x_4 = \frac{U_{K(C)} S_{\delta}}{100 S_{\text{НОМ1}}} \left(\frac{U_{(B)\text{НОМ}}}{U_{\delta 3}} \right)^2 = 0, \quad x_5 = x_0 l_1 \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 3}^2} = 0,4 \cdot 120 \cdot \frac{1000}{200^2} = 1,2,$$

где $U_{K(H)} = 6 \%$, $U_{K(B)} = 11 \%$, $U_{K(C)} = 0 \%$ (см. п.1 примера);

$$x_6 = \frac{U_{K(B)} S_{\delta}}{100 S_{\text{НОМ2}}} \left(\frac{U_{(H)\text{НОМ}}}{U_{\delta 2}} \right)^2 = \frac{12 \cdot 1000}{100 \cdot 90} \cdot \left(\frac{38,5}{35} \right)^2 = 1,613;$$

$$x_7 = \frac{U_{K(H)} S_{\delta}}{100 S_{\text{НОМ2}}} \left(\frac{U_{(H)\text{НОМ}}}{U_{\delta 2}} \right)^2 = \frac{8 \cdot 1000}{100 \cdot 90} \cdot \left(\frac{38,5}{35} \right)^2 = 1,075;$$

$$x_8 = 0, \quad x_9 = x_0 l_4 \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 2}^2} = 0,4 \cdot 20 \cdot \frac{1000}{35^2} = 6,53;$$

$$x_{10} = \frac{U_K S_{\delta}}{100 S_{\text{НОМ3}}} \left(\frac{U_{(H)\text{НОМ}}}{U_{\delta 1}} \right)^2 = \frac{8 \cdot 1000}{100 \cdot 20} \cdot \left(\frac{6,6}{6,6} \right)^2 = 4,0;$$

$$x_{11} = \frac{x_P \% I_{\delta 1} U_{\text{НОМ}}}{100 I_{\text{НОМ}} U_{\delta 1}} = \frac{4 \cdot 87,58 \cdot 10}{100 \cdot 0,3 \cdot 6,6} = 17,693;$$

$$R_{12} = R_0 l_5 \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = 0,45 \cdot 3 \cdot \frac{1000}{6,6^2} = 30,992, \quad x_{12} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{1000}{6,6^2} = 5,51;$$

$$x_{13} = x_{14} = x_0 l_2 \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 4}^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{1000}{104,5^2} = 2,93;$$

$$x_{15} = \frac{U_K S_{\delta}}{100 S_{\text{НОМ4}}} \left(\frac{U_{(H)\text{НОМ}}}{U_{\delta 6}} \right)^2 = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 60} \cdot \left(\frac{11}{10,45} \right)^2 = 1,921.$$

Относительная ЭДС

$$E_q^n = \frac{U_{\Gamma(\text{НОМ})}}{U_{\delta 5}} = \frac{13,8}{11,95} = 1,155.$$

Результирующие сопротивления схемы до точки К1:

$$x_{1\Sigma} = x_1 + x_2 + (x_3 + x_5 + x_6) // (x_4 + x_{13} + x_{14} + x_8) + \\ + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} = 39,643;$$

$$R_{1\Sigma} = R_{12} = 30,992, \quad Z_{1\Sigma} = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2} = 50,32.$$

Начальный сверхпереходный ток в точке К1 в именованных единицах, приведенный к напряжению 6,6 кВ,

$$I''_{K1} = \frac{E''_q}{Z_{1\Sigma}} I_{\delta 1} = \frac{1,155}{50,32} \cdot 87,58 = 2,01 \text{ кА}.$$

Результирующее сопротивление схемы до точки K2:

$$x_{2\Sigma} = x_1 + x_2 + (x_4 + x_{13}) // (x_3 + x_5 + x_6 + x_8 + x_{14}) + x_{15} = 6,45.$$

Начальный сверхпереходный ток в точке K2 в именованных единицах, приведенный к напряжению ступени K3,

$$I''_{K2} = \frac{E''_q}{x_{2\Sigma}} I_{\delta 6} = \frac{1,155}{6,45} \cdot 55,3 = 9,907 \text{ кА}.$$

4. Приближенное приведение в относительных единицах

4.1. Номера ступеней трансформации приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

$U_{\text{ном}}$ (кВ) ступени	6	35	220	110	13,8	10
№ ступени	1	2	3	4	5	6
U_{δ} (кВ) ступени	6,3	37	230	115	13,8	10,5
I_{δ} (кА) ступени	91,75					55

За базисную мощность принимаем $S_{\delta} = 1000$ МВА. Согласно рекомендованной шкале (2.28) для рассматриваемой схемы имеем следующий ряд базисных напряжений ступеней трансформации (табл. 2.3).

Базисные токи целесообразно вычислять только на ступенях K3:

$$I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta 1}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 91,75 \text{ кА}, \quad I_{\delta 6} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta 6}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ кА}.$$

4.2. Сопротивления и ЭДС схемы замещения в относительных единицах рассчитываются по упрощенным выражениям:

$$x_1 = x''_d \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}} = 0,2 \cdot \frac{1000}{150} = 1,33, \quad x_2 = \frac{U_{K(H)} S_{\delta}}{100 S_{\text{ном1}}} = \frac{6 \cdot 1000}{100 \cdot 120} = 0,5;$$

$$x_3 = \frac{U_{K(B)} S_{\delta}}{100 S_{\text{ном1}}} = \frac{11 \cdot 1000}{100 \cdot 120} = 0,917, \quad x_4 = \frac{U_{K(C)} S_{\delta}}{100 S_{\text{ном1}}} = 0,$$

где $U_{K(H)} = 6 \%$, $U_{K(B)} = 11 \%$, $U_{K(C)} = 0$ (см. п. 1 примера),

$$x_5 = x_0 l_1 \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 3}^2} = 0,4 \cdot 120 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,907;$$

$$x_6 = \frac{U_{K(B)} S_{\delta}}{100 S_{\text{ном2}}} = \frac{12 \cdot 1000}{100 \cdot 90} = 1,33, \quad x_7 = \frac{U_{K(H)} S_{\delta}}{100 S_{\text{ном2}}} = \frac{8 \cdot 1000}{100 \cdot 90} = 0,89;$$

$$x_8 = 0, \quad x_9 = x_0 l_4 \frac{S_6}{U_{62}^2} = 0,4 \cdot 20 \cdot \frac{1000}{37^2} = 5,84;$$

$$x_{10} = \frac{U_K S_6}{100 S_{\text{НОМ}3}} = \frac{8 \cdot 1000}{100 \cdot 20} = 4, \quad x_{11} = \frac{4 \cdot 91,75 \cdot 10}{100 \cdot 0,3 \cdot 6,3} = 19,4;$$

$$R_{12} = R_0 l_5 \frac{S_6}{U_{61}^2} = 0,45 \cdot 3 \cdot \frac{1000}{6,3^2} = 34, \quad x_{12} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{1000}{6,3^2} = 6;$$

$$x_{13} = x_{14} = R_0 l_2 \frac{S_6}{U_{64}^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{1000}{115^2} = 2,42, \quad x_{15} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 60} = 1,75;$$

$$E''_q = \frac{U_{\Gamma(\text{НОМ})}}{U_{65}} = \frac{13,8}{13,8} = 1.$$

Результирующие сопротивления схемы до точки $K1$ составляют:

$$x_{1\Sigma} = x_1 + x_2 + (x_3 + x_5 + x_6) // (x_4 + x_{13} + x_{14} + x_8) + \\ + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} = 39,87;$$

$$R_{1\Sigma} = R_{12} = 34, \quad Z_{1\Sigma} = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2} = 52,4.$$

Начальный сверхпереходный ток в точке $K1$ в именованных единицах, приведенный к ступени КЗ,

$$I''_{K1} = \frac{E''_q}{Z_{1\Sigma}} I_{61} = \frac{1}{52,4} \cdot 91,75 = 1,75 \text{ кА}.$$

Результирующий реактанс до точки $K2$:

$$x_{2\Sigma} = x_1 + x_2 + (x_4 + x_{13}) // (x_3 + x_5 + x_6 + x_8 + x_{14}) + x_{15} = 5,21.$$

Начальный ток в точке $K2$ в именованных единицах, приведенный к напряжению ступени КЗ,

$$I''_{K2} = \frac{E''_q}{x_{2\Sigma}} I_{66} = \frac{1}{5,21} \cdot 55 = 10,56 \text{ кА}.$$

Все полученные величины токов КЗ при точном приведении параметров в именованных и относительных единицах совпадают, равно как и при приближенном. Погрешность величин тока КЗ при приближенном расчете по отношению к точному для точки $K1$ составляет 13 %, для точки $K2$ – 6 %. Данный пример не является характерным с точки зрения погрешности, которая, как правило, не превышает 5–6 %.

2.3. Преобразование схем замещения

Целью преобразования схемы замещения при расчете режимов КЗ является ее приведение к простейшему виду (рис. 2.4) – эквивалентной ветви с результирующим реактансом и ЭДС (x_Σ, E_Σ) либо к виду многолучевой схемы, содержащей $x_{i\Sigma}, E_{i\Sigma}$.

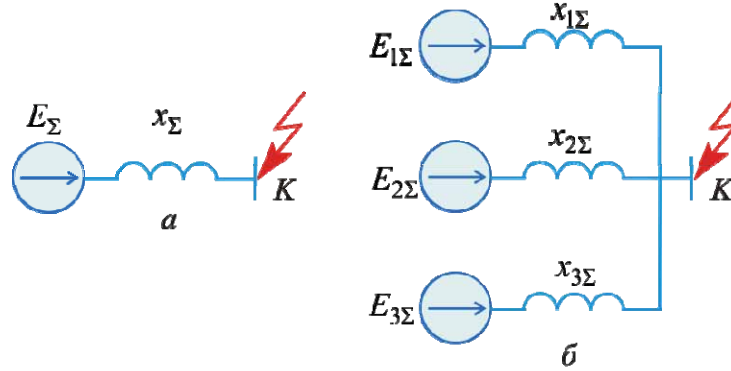


Рис. 2.4. Эквивалентные схемы энергосистемы

Если исходная схема ЭС содержит замкнутые контуры, то достижение конечного результата преобразования осуществляется в два этапа. На первом этапе освобождаются от замкнутых контуров, приводя схему к сложно-радиальному виду. Здесь вполне достаточными приемами упрощения являются взаимные эквивалентные преобразования «треугольника» и «звезды» сопротивлений (рис. 2.5).

При известных значениях «треугольника» сопротивлений Z_{21}, Z_{31}, Z_{23} параметры лучей «звезды» рассчитываются по выражениям:

$$Z_1 = \frac{Z_{21}Z_{31}}{Z_{21} + Z_{31} + Z_{23}};$$

$$Z_2 = \frac{Z_{21}Z_{23}}{Z_{21} + Z_{31} + Z_{23}};$$

$$Z_3 = \frac{Z_{31}Z_{23}}{Z_{21} + Z_{31} + Z_{23}}.$$

При переходе от «звезды» сопротивлений Z_1, Z_2, Z_3 к «треугольнику» сопротивлений используют соотношения:

$$Z_{21} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1Z_2}{Z_3}, \quad Z_{31} = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1Z_3}{Z_2}, \quad Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2Z_3}{Z_1}.$$

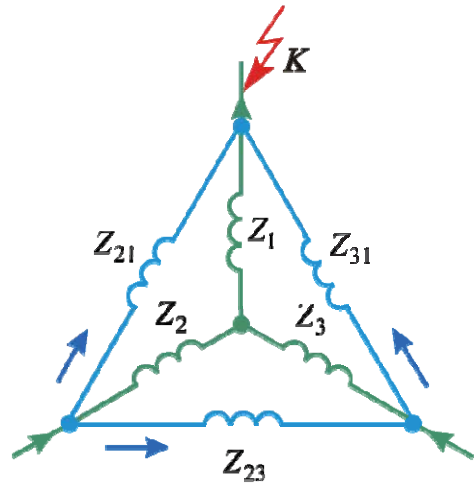


Рис. 2.5

В редких случаях в качестве приема упрощения используется преобразование многолучевой «звезды» в многоугольник с диагоналями и числом вершин, равных числу лучей «звезды» исходной схемы [1].

На втором этапе применительно к схеме сложно-радиального вида используют приемы последовательного и параллельного эквивалентирования фрагментов схемы. В частности, при замене n параллельно соединенных активных ветвей с параметрами E_i, Z_i эквивалентная ветвь будет иметь

$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{Y_{\text{ЭКВ}}} \sum_{i=1}^n E_i Y_i, \quad Z_{\text{ЭКВ}} = 1/Y_{\text{ЭКВ}}, \quad (2.29)$$

где $Y_{\text{ЭКВ}} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n, Y_i = 1/Z_i,$

и для двух параллельных ветвей

$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_1 Z_2 + E_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad Z_{\text{ЭКВ}} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (2.30)$$

Прием приведения сложной схемы (см. рис. 2.4, б) к лучевому виду изложен в разд. 5.1.

Следует отметить, что профессиональные компьютерные программы расчета режимов короткого замыкания алгоритмически не связаны с созданием электрической схемы замещения, ее преобразованием и упрощением.

Контрольные вопросы

1. Какие допущения принимаются при расчетах переходных процессов и как влияет каждое из них на точность расчета?
2. Что лежит в основе перехода от принципиальной к расчетной электрической схеме замещения?
3. Каковы основные достоинства системы относительных единиц и какова область ее приложения?
4. В чем заключается отличие точного и приближенного приведения параметров электрической схемы?
5. Как формируется ряд средних номинальных напряжений ступеней трансформации?
6. Каковы основные приемы упрощения электрических схем замещения?
7. Изменится ли значение сопротивления (Ом) воздушной электропередачи 110 кВ при приведении его к ступени напряжения 10 кВ?

Глава 3

ТРЕХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

3.1. Трехфазное КЗ в простейшей цепи, питаемой шинами неизменного напряжения

В переходном режиме происходят как количественные, так и качественные изменения параметров режима системы.

Симметричную трехфазную цепь с сосредоточенными активными сопротивлениями и индуктивностями при отсутствии в ней трансформаторных связей назовем простейшей цепью. Количественные соотношения электромагнитного переходного процесса в трехфазной электрической цепи установим сначала для условий, когда источником питания являются *шины неизменного напряжения* ($U_{\max} = \text{const}$), которые принято называть *шинами бесконечной мощности* (ШБМ). Рассмотрим составляющие тока и закономерности их изменения при трехфазном КЗ в простейшей схеме (рис. 3.1). В ней отсутствует емкость, что исключает возможность возникновения колебательных контуров, а это значительно упрощает характер протекания переходного процесса в цепи. В силу сохранения симметрии фаз как в нормальном, так и переходном режимах, расчетные выражения приводим для одной фазы – *A*.

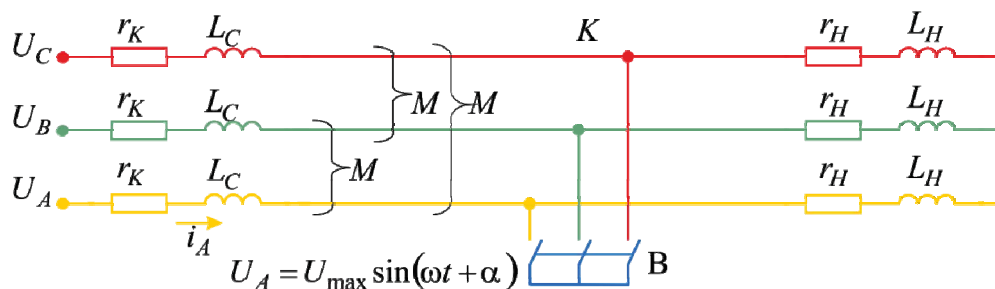


Рис. 3.1. Схема простейшей электрической цепи

В нормальном режиме по схеме протекает ток, определяемый напряжением источника питания и результирующим сопротивлением цепи,

$$i_A = \frac{U_{A\max}}{Z_{\Sigma}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) = I_{A\max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi), \quad (3.1)$$

где $U_A = U_{A\max} \sin(\omega t + \alpha)$ – закон изменения напряжения фазы *A*;
 $Z_{\Sigma} = Z_K + Z_H$ – суммарное сопротивление схемы в нормальном режиме;
 φ – аргумент этого сопротивления (Z_{Σ}); α – фаза напряжения.

Для облегчения восприятия излагаемого материала наряду с выводом необходимых расчетных выражений будем осуществлять их интерпретацию на векторной диаграмме (см. рис. 3.2). Ось +1 является осью отсчета углов, а вертикальная ось tt – неподвижной осью времени. Напомним, что любую синусоидальную величину можно представить вращающимся вектором. Проекция этого вектора на неподвижную ось времени дают мгновенные значения интересующей величины. Положению векторов напряжения и тока соответствует время $t = 0$.

Нормальный режим, предшествующий КЗ, характеризуется векторами напряжения (U_A, U_B, U_C) и тока (I_A, I_B, I_C). Положение вектора U_A для момента $t = 0$ определяется углом α , который называют *фазой включения* (возникновения) короткого замыкания. Положение вектора I_A связано с вектором напряжения U_A и углом φ . Векторы напряжений фаз A, B, C симметричны и имеют относительный сдвиг в 120° ; равным образом это относится и к векторам токов.

Включением выключателя В создается режим КЗ в точке K , которая делит схему на две части: правую и левую. Правая часть не содержит источника питания, и ток в ней с течением времени затухнет до нуля, а энергия, запасенная в индуктивности L_H , выделится в виде тепла в активном сопротивлении r_H . По этой причине указанная часть схемы не представляет интереса.

Левая часть схемы содержит источник питания, поэтому наряду с вынужденной (периодической) составляющей тока в цепи возникает свободный (апериодический) ток. Получим расчетные выражения для тока КЗ и рассмотрим особенности протекания переходного процесса.

Дифференциальное уравнение равновесия ЭДС по второму закону Кирхгофа для фазы A этой части схемы имеет вид:

$$U_A = r_K i_A + L_c \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt}, \quad (3.2)$$

где L_c – собственная и M – взаимная индуктивности фаз.

Учитывая, что в симметричном режиме мгновенные значения токов трех фаз связаны соотношением $i_B + i_C = -i_A$, дифференциальное уравнение переходного процесса (3.2) можно представить как функцию одной переменной – тока фазы A :

$$U_A = r_K i_A + (L_c - M) \frac{di_A}{dt} = r_K i_A + L_K \frac{di_A}{dt}. \quad (3.3)$$

Здесь $L_K = L_c - M$ представляет результирующую индуктивность фазы. Уравнение (3.3) справедливо для любой фазы; его решение пред-

ставляет закономерность изменения тока КЗ в переходном режиме (упускаем индекс фазы A), который запишется так:

$$i_K = i_{\Pi} + i_a, \quad (3.4)$$

где i_{Π} – вынужденная периодическая составляющая тока; i_a – свободная (апериодическая) составляющая тока.

Эти составляющие тока короткого замыкания определяются следующими функциями времени:

$$i_{\Pi} = \frac{U_{\max}}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) = I_{\Pi \max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K); \quad (3.5)$$

$$i_a = i_{a(0)} e^{-t/T_a}, \quad (3.6)$$

где Z_K – сопротивление короткозамкнутого участка цепи; φ_K – аргумент сопротивления Z_K ; $i_{a(0)}$ – начальное значение апериодической составляющей тока КЗ;

$$T_a = \frac{L_K}{r_K} = \frac{x_K}{\omega r_K} \quad (3.7)$$

– постоянная времени затухания апериодического тока.

Как видно, T_a определяется параметрами короткозамкнутой цепи и численно равна времени, в течение которого апериодический ток уменьшается в $e = 2,72$ раз, или до 0,368 своего начального значения. Подкасательная к любой точке экспоненты (см. рис. 3.4) в принятом для оси времени масштабе дает значение постоянной времени T_a . Это свойство используется при ее экспериментальном определении.

В выражении (3.6) неопределенным пока является начальное значение апериодической слагаемой $i_{a(0)}$. Его расчет основан на первом законе коммутации: в цепи с индуктивностью в момент внезапного нарушения режима мгновенное значение тока остается неизменным. Применительно к рассматриваемым условиям имеем: мгновенное значение тока нормального режима (i_0) равно сумме начальных мгновенных значений периодической и апериодической составляющих тока КЗ,

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

Из этого соотношения можно определить $i_{a(0)}$, используя выражения (3.1) и (3.5), для времени $t = 0$:

$$i_{a(0)} = i_0 - i_{\Pi(0)} = I_{\max} \sin(\alpha - \varphi) - I_{\Pi \max} \sin(\alpha - \varphi_K), \quad (3.8)$$

т. е. начальное значение апериодической слагаемой определяется разностью мгновенных значений периодических токов до и после КЗ.

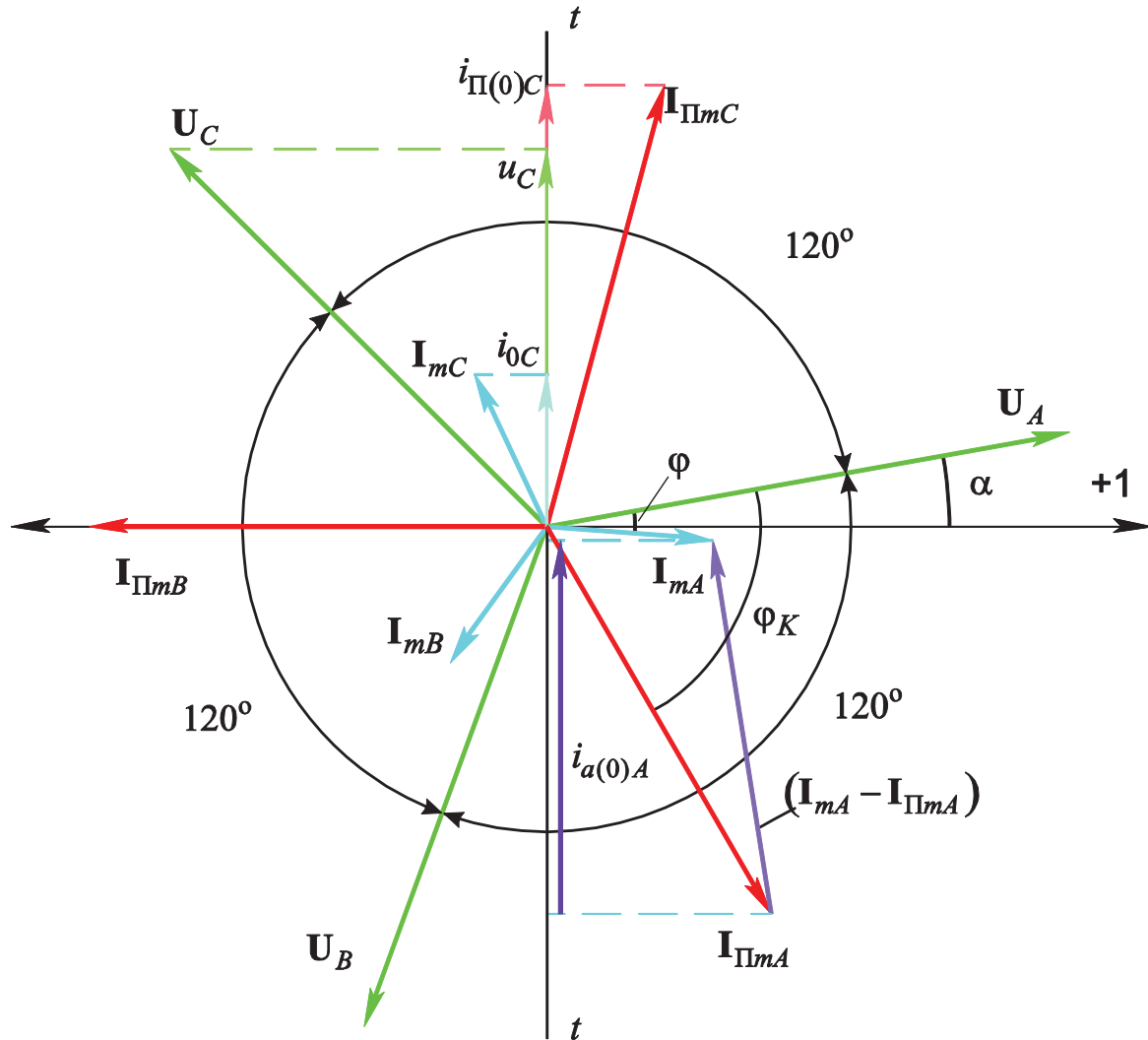


Рис. 3.2. Векторная диаграмма для начального момента трехфазного КЗ

С учетом изложенного выше закон изменения полного тока КЗ определяется выражением

$$i_K = I_{\text{Пm}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a(0)} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{\text{Пm}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{\text{Пm}} \sin(\alpha - \varphi_K)] e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (3.9)$$

При условии питания схемы источником неизменного напряжения амплитуда периодической слагаемой тока КЗ ($I_{\text{Пm}}$) также остается постоянной в течение всего переходного режима. Завершение переходного процесса определяется затуханием аperiodической слагаемой и по времени составляет $(4 \dots 5) T_a$, или $0,1 \dots 0,3$ с.

Возвратимся к диаграмме (см. рис. 3.2), на которой векторы $I_{\Pi A}$, $I_{\Pi B}$, $I_{\Pi C}$ характеризуют периодические слагаемые тока нового режима. По величине они, естественно, больше векторов тока нормального режима и в общем случае имеют иную фазу (φ_K). Поскольку мгновенные значения периодических токов i_0 и $i_{\Pi(0)}$ являются проекцией соответственно векторов I_m и $I_{\Pi m}$ на ось времени, то начальное значение аperiodического тока $i_{a(0)}$ можно рассматривать как проекцию вектора ($I_m - I_{\Pi m}$) на ту же ось (на рис. 3.2 показан только для фазы A). В зависимости от фазы включения α начальное значение тока $i_{a(0)}$ может изменяться от наибольшей величины, когда вектор ($I_m - I_{\Pi m}$) параллелен оси tt , до нуля, когда этот вектор перпендикулярен ей. Для трехфазной системы одно из этих условий возможно лишь в одной фазе.

Из выражения (3.8) следует, что наибольшее значение $i_{a(0)}$ зависит как от фазы включения (α), так и от векторов периодического тока режима КЗ и предшествующего режима. Векторная диаграмма (рис. 3.2) наглядно показывает: при отстающем характере тока предшествующего режима по мере его уменьшения начальное значение свободного тока возрастает. Наконец, при отсутствии предшествующего тока в цепи величина $i_{a(0)}$ может достигать амплитуды периодической слагающей нового режима ($I_{\Pi m}$), если в момент короткого замыкания эта слагающая проходит через свой максимум (положительный или отрицательный), что отражено на рис. 3.3. Режим холостого хода до короткого замыкания, как возможный, обычно на практике и принимают в качестве расчетного*.

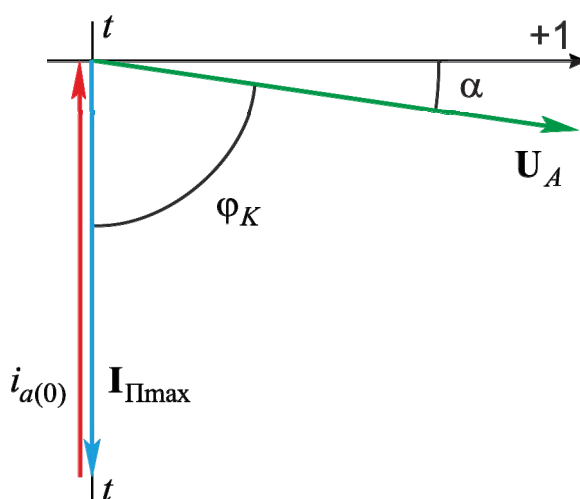


Рис. 3.3. Условия возникновения $i_{a(0)}$ -max при хх до КЗ

* При опережающем токе нормального режима возможны частные случаи, когда начальное значение аperiodической слагающей больше амплитуды периодического тока КЗ [11].

Важной характеристикой тока в переходном режиме является ударный ток короткого замыкания i_y . Он представляет максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания. Расчетное выражение для указанной характеристики тока обычно находят для условий отсутствия последнего в предшествующем режиме и наибольшем значении апериодической составляющей*.

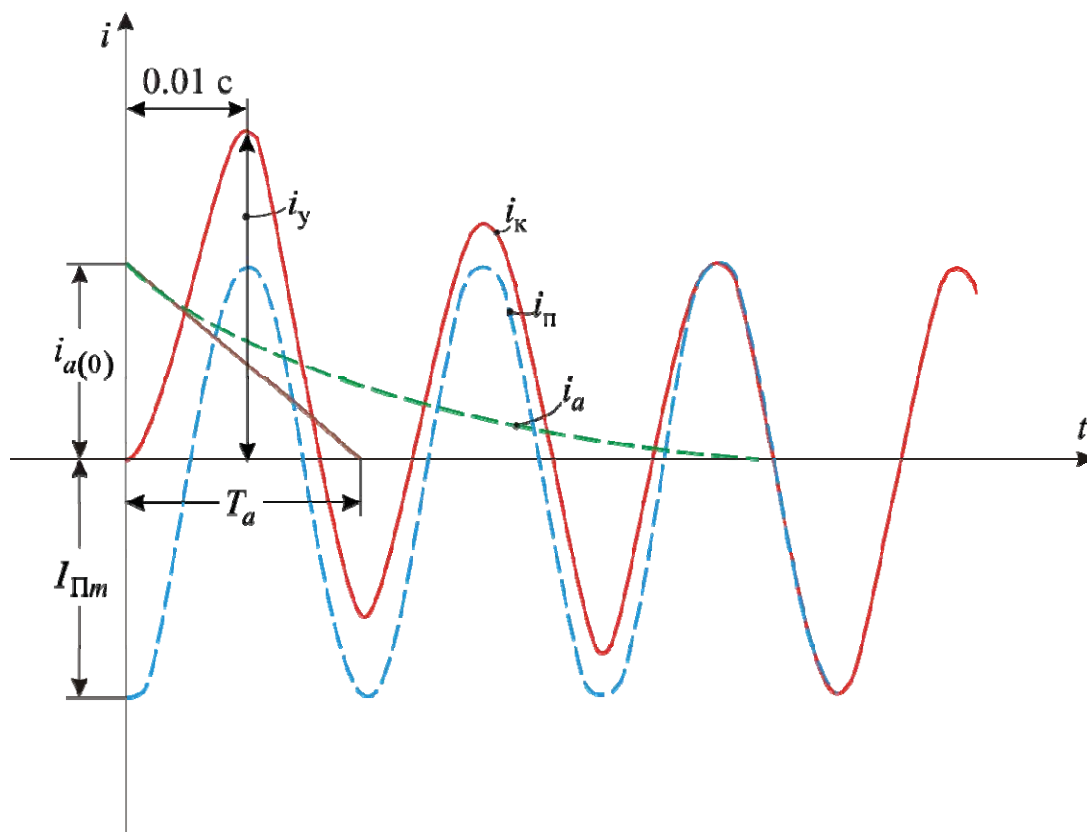


Рис. 3.4. Осциллограмма тока короткого замыкания при $i_{a(0)}$ -max

Сказанное иллюстрирует волновая диаграмма токов (рис. 3.4), отражающая описанные условия ($I_{\max} = 0$, $i_{a(0)} = I_{\text{пmax}}$). Из рис. 3.4 следует, что ударный ток (i_y) наступает спустя полпериода ($T/2 = 0,01$ с) после возникновения короткого замыкания и равен сумме амплитудного значения периодического тока и величине апериодического тока для

* В предварительно разомкнутой цепи максимум мгновенного значения полного тока КЗ наступает, когда в момент нарушения режима напряжение расчетной фазы источника проходит через ноль, т. е. при $\alpha = 0$. Учитывая, что в большинстве случаев у цепи короткого замыкания φ_K близко к 90° , условие возникновения наибольшей величины апериодической слагаемой и условие максимума мгновенного значения полного тока КЗ очень близки друг к другу. Поэтому в практических расчетах ударный ток КЗ обычно находят при наибольшем значении апериодической слагаемой, что дает более простое расчетное выражение.

времени $t = 0,01$ с. С учетом сказанного выражение для ударного тока КЗ запишется так:

$$i_y = I_{п\max} + I_{п\max} e^{-0,01/T_a} = I_{п\max} K_y = \sqrt{2} I_{п} K_y, \quad (3.10)$$

где $K_y = 1 + e^{-0,01/T_a}$ – ударный коэффициент; $I_{п}$ – действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент короткого замыкания ($t = 0$).

Как следует из выражения (3.10), K_y показывает превышение ударного тока КЗ над амплитудой периодической слагаемой. Его величина зависит от постоянной времени T_a (рис. 3.5) и находится в пределах $1 < K_y < 2$. Чем больше величина активного сопротивления цепи, тем быстрее затухает апериодический ток и тем соответственно меньше ударный коэффициент. Он достигает предельных значений при следующих условиях: при отсутствии в цепи реактивного сопротивления ($x_K = 0$) апериодического тока, и $K_y = 1$; при отсутствии активного сопротивления ($r_K = 0$) апериодический ток не затухает, и $K_y = 2$. Параметр K_y по выражению (3.10) дает погрешность по отношению к точному выражению в пределах 0,1...1,4 % при $x_K / r_K \geq 3$ и до 2,5 % при $x_K / r_K = 1,3$.

Ударный ток используется для проверки электротехнической аппаратуры на электродинамическую (механическую) прочность.

3.2. Действующее значение тока короткого замыкания

Действующим значением тока КЗ в произвольный момент времени t называют среднеквадратичное значение полного тока за один период T , в середине которого находится рассматриваемый момент, т. е.

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_k^2 dt}. \quad (3.11)$$

Выражение полного тока $i_k = f(t)$ в общем случае имеет сложную зависимость и в течение переходного процесса изменяется, следовательно, и действующее значение тока не остается постоянным во вре-

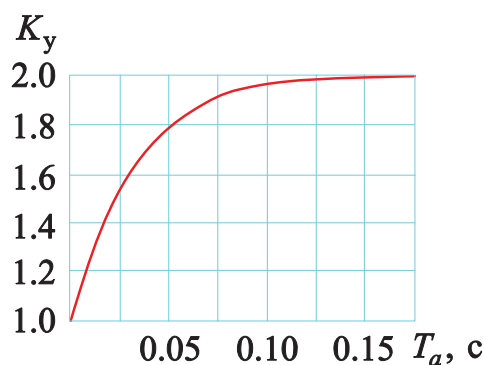


Рис. 3.5 Зависимость ударного коэффициента от постоянной времени T_a

мени. Для упрощения вычисления I_t принимают, что действующие значения периодической и аperiodической слагающих за рассматриваемый период T не изменяются, и каждая из них равна своему значению в данный момент времени t , т. е.

$$I_{пт} = \frac{I_{пmt}}{\sqrt{2}}, \quad I_{ат} = i_{ат} = \sqrt{2}I_{п(0)}e^{-t/T_a}.$$

С учетом принятых допущений действующее значение полного тока КЗ в момент t после преобразования выражения (3.10) определится так:

$$I_t = \sqrt{I_{пт}^2 + I_{ат}^2}. \quad (3.12)$$

Метод расчета $I_{пт}$, когда источником питания является генератор конечной мощности, изложен в разд. 5.3; для мощного источника, напряжение которого в момент КЗ неизменно, периодическая слагаемая в переходном режиме остается постоянной, т. е. $I_{пт} = I_{п(0)}$.

Как правило, на практике рассчитывают I_y , *наибольшее действующее значение* полного тока КЗ. I_y имеет место в первый период переходного процесса, в середине которого находится момент времени $t = 0,01$ с. С учетом соотношения (3.10) выражению (3.12) можно придать вид:

$$I_y = I_{п(0)}\sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}. \quad (3.13)$$

Здесь принято, что периодическая составляющая за время $t = 0,01$ с не изменяется. В соответствии с указанными выше пределами изменения K_y отношение $I_y/I_{п}$ находится в пределах

$$1 < I_y / I_{п} < \sqrt{3}.$$

По параметрам I_t и I_y определяется термическое воздействие тока короткого замыкания на электротехническую аппаратуру.

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуются «шины бесконечной мощности»?
2. Какими параметрами определяется постоянная времени T_a и какова ее физическая сущность?
3. Для каких условий возникновения короткого замыкания рассчитывается ударный ток?

Глава 4

ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

4.1. Режимные состояния машин

Математические модели синхронной и асинхронной машин (АМ) и их параметры зависят от целей расчета режима (установившийся или переходный), его стадии, требований к точности расчета и от влияния рассматриваемой машины на исследуемый процесс. В этом смысле будем различать следующие режимные состояния машин:

1. Нормальный установившийся режим, в котором синхронная машина (СМ) характеризуется синхронными параметрами для $t = (-0)$.

2. Установившийся режим КЗ, в котором машина также представляется синхронными параметрами для $t = \infty$.

3. Переходный режим для момента $t = 0$. Здесь, как правило, задача ограничена расчетом начального значения периодической слагаемой тока короткого замыкания. Для этих условий машина характеризуется переходными или сверхпереходными параметрами.

4. Переходный режим с полным отражением вынужденных и свободных составляющих токов на всем интервале времени. Для решения этой задачи режим машины описывается уравнениями Парка–Горева.

4.2. Схема замещения и параметры синхронной машины в установившемся режиме

Установим электрическую схему замещения и параметры синхронной машины для стационарного режима. На рис. 4.1, *a* представлен разрез СМ и прямоугольная система координат d, q , жестко связанная с ротором. Ось d называется продольной осью машины, ось q – поперечной. В продольной оси взаимодействуют две магнитно связанные обмотки (см. рис. 4.1, *b*): обмотка возбуждения (расположена слева) и обмотка статора. В поперечной оси располагается только контур статорной обмотки. Реактивное сопротивление каждого контура в соответствии с физикой явлений представлено в виде двух составляющих:

$x_{\sigma f}, x_{\sigma}$ – реактансов рассеяния обмотки возбуждения и обмотки статора;

x_{ad}, x_{aq} – индуктивных сопротивлений продольной и поперечной реакций статора.

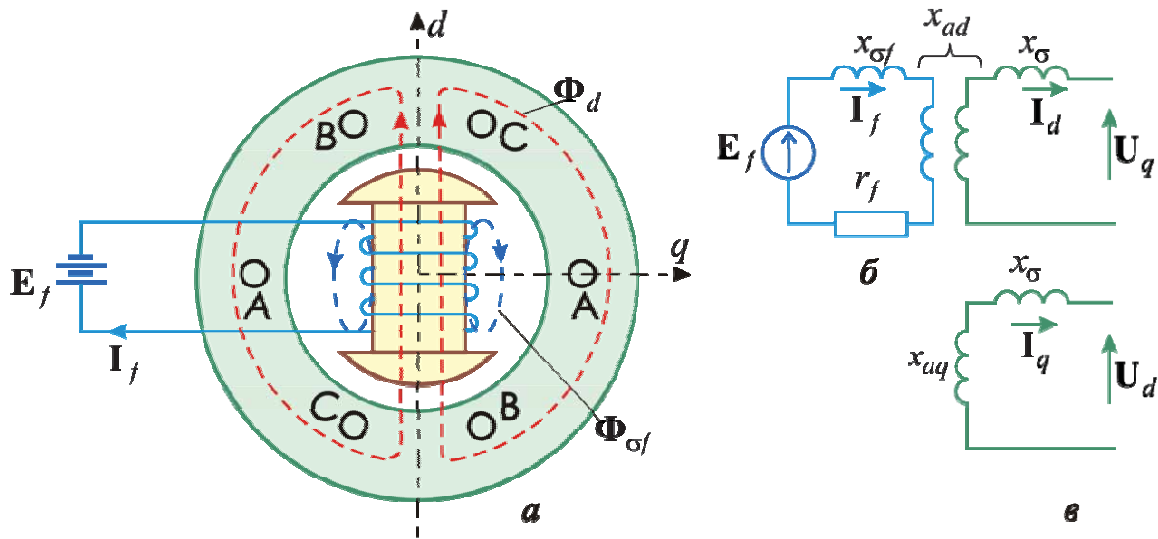


Рис. 4.1: а – разрез синхронной машины и магнитные потоки на холостом ходу; б – магнитно связанные контуры в продольной оси d ; в – контур обмотки статора в поперечной оси q

В неявнополюсной машине воздушный зазор между ротором и статором по всей окружности расточки статора одинаков, что отражается в равенстве $x_{ad} = x_{aq}$, и поэтому для такой машины *продольное* x_d и *поперечное* x_q , *синхронные индуктивные сопротивления*, также одинаковы, при этом

$$x_d = x_\sigma + x_{ad}, \quad x_q = x_\sigma + x_{aq}.$$

По существу, x_d и x_q представляют полные индуктивные сопротивления статорной обмотки (рис. 4.1, б, в), соответствующие осям d и q синхронной машины.

В установившемся режиме постоянный ток обмотки возбуждения \mathbf{I}_f^* создает по оси d магнитный поток Φ_f (рис. 4.1, а), который можно представить как сумму двух составляющих:

$$\Phi_f = \Phi_{\sigma f} + \Phi_d, \quad (4.1)$$

где $\Phi_{\sigma f} = \sigma_f \Phi_f$ – поток рассеяния обмотки возбуждения; $\Phi_{\sigma f}$ взаимодействует только с этой обмоткой, замыкаясь по воздушному пространству; σ_f – коэффициент рассеяния обмотки возбуждения; Φ_d – полезный поток.

* Жирным шрифтом прямого начертания обозначены векторные переменные.

Полезный поток Φ_d при вращении ротора индуцирует в обмотке статора синхронную ЭДС, которая отстает от потока Φ_d на 90° :

$$\mathbf{E}_q = \omega \Phi_d. \quad (4.2)$$

В системе координат dq (рис. 4.2) вектор \mathbf{E}_q располагается на оси q . В нагруженной машине вектор \mathbf{E}_q уравнивается геометрической суммой вектора напряжения \mathbf{U} на зажимах генератора и падения напряжения на его реактансах. Как следует из диаграммы (рис. 4.2, а), для неявнополюсного генератора справедливо векторное уравнение

$$\mathbf{E}_q = \mathbf{U} + \mathbf{I}jx_d, \quad (4.3)$$

т. е. нет необходимости разлагать ток и напряжение на продольную и поперечную составляющие. Поэтому неявнополюсную синхронную машину можно представить схемой, приведенной на рис. 4.3, а.

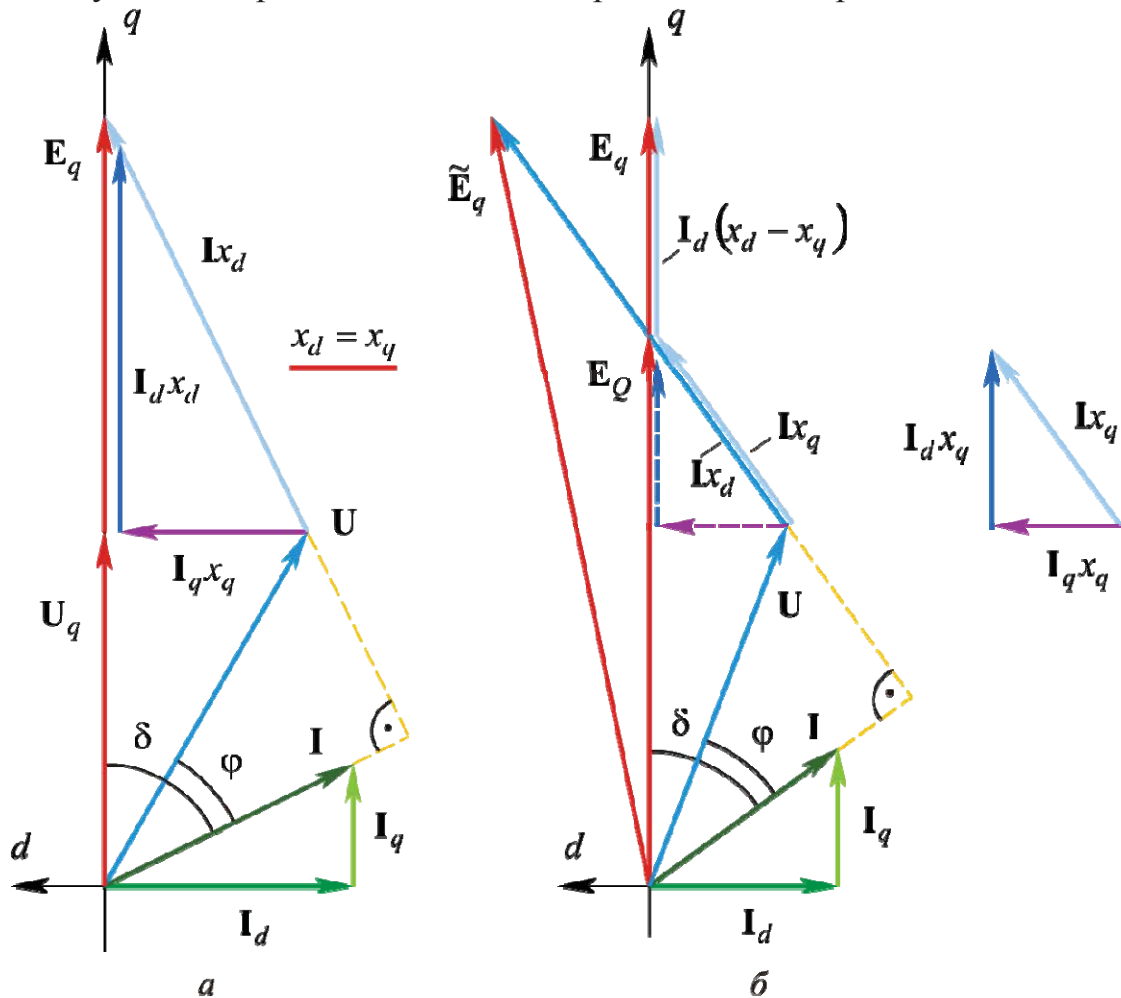


Рис. 4.2. Векторные диаграммы неявнополюсной (а) и явнополюсной (б) машин

Для явнополюсных машин индуктивные сопротивления x_d и x_q неодинаковы: $x_q < x_d$ (обычно $x_q \approx 0,6x_d$). Это объясняется неодинаковым воздушным зазором по длине окружности расточки статора: в поперечной оси он больше, чем в продольной. Неравенство x_d и x_q , строго говоря, не позволяет заместить машину одним сопротивлением. В этом случае реальную машину заменяют фиктивной с одинаковыми реактансами по оси d и q . Если исходить из того, что при одном и том же напряжении U и угле δ у обеих машин совпадали их активная и реактивная мощности, то сопротивление фиктивной машины следует принять x_q . ЭДС такой машины будет представлена вектором E_Q , который совпадает с положением вектора E_q (см. рис. 4.2, б).

Таким образом, введя фиктивную ЭДС E_Q , можно заменить явнополюсную машину эквивалентной неявнополюсной с реактивным сопротивлением x_q . Этому соответствует схема замещения, представленная на рис. 4.3, в.

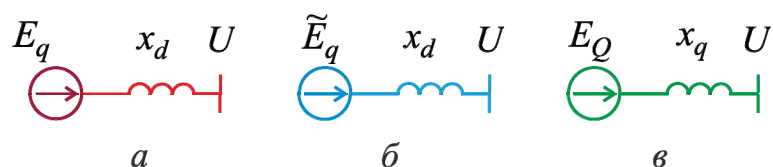


Рис. 4.3. Схемы замещения неявнополюсной (а) и явнополюсной (б, в) машин в стационарном режиме

С незначительной погрешностью допустимо явнополюсную машину представлять эквивалентной неявнополюсной с реактивностью x_d и ЭДС \tilde{E}_q (см. рис. 4.2, б). Различие \tilde{E}_q и E_q составляет 1...2 %.

Диапазон синхронных реактивных сопротивлений машин составляет:

для неявнополюсных $x_d = x_q = 0,95 \dots 2,55$;

для явнополюсных $x_d = 0,6 \dots 1,45$; $x_q = 0,4 \dots 1$.

Согласно векторной диаграмме (рис. 4.2, а) модуль синхронной ЭДС E_q можно вычислить на основе прямоугольного треугольника с вершинами: «начало координат», «прямой угол», «конец вектора E_q » по следующему выражению:

$$E_q = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x_d)^2}. \quad (4.4)$$

По выражениям, аналогичным (4.4), рассчитываются E_Q и \tilde{E}_q .

В заключение для сравнения приведем значения параметров для двух синхронных генераторов:

- неявнополюсный генератор с $x_d = x_q = 1,45$ при номинальной нагрузке имеет $U = 1$, $I = 1$, $\cos \varphi = 0,85$ ($\varphi = 31,8^\circ$); им соответствует $E_q = 2,15$ и $\delta = 34,9^\circ$;

- явнополюсный генератор с $x_d = 1,45$, $x_q = 1$ при номинальной нагрузке имеет $U = 1$, $I = 1$, $\cos \varphi = 0,85$, $E_q = 2,14$ и $\delta = 29^\circ$; эквивалентные ему неявнополюсные генераторы имеют $\tilde{E}_q = 2,15$, $x_d = 1,45$ или $E_Q = 1,75$ и $x_q = 1$.

4.3. Переходные ЭДС и реактивности синхронной машины

Обратимся к синхронной явнополюсной машине без демпферных (успокоительных) обмоток. При КЗ возникает переходный процесс, приводящий к изменению токов и напряжений предшествующего режима. Выясним, какими ЭДС и реактивностями можно характеризовать синхронную машину в начальный момент переходного процесса с целью расчета периодической составляющей тока КЗ для $t = 0$.

Постановка задачи обусловлена тем, что синхронная ЭДС (E_q), характеризующая машину в установившемся режиме, в момент КЗ скачкообразно изменяется. В силу этого она неизвестна и неприемлема для расчета переходного режима, равным образом как и x_d и x_q , связанные с E_q .

Для решения поставленной задачи обратимся к балансу магнитных потоков в продольной оси d синхронной машины для нормального режима (см. рис. 4.4, *a*). В указанной оси взаимодействуют две магнитосвязанные обмотки: обмотка возбуждения и обмотка статора.

В режиме холостого хода ток обмотки возбуждения \mathbf{I}_f^* создает магнитный поток Φ_f , состоящий из *потока рассеяния ротора* $\Phi_{\sigma f}$ и *полезного потока* Φ_d :

* \mathbf{I}_f является током i_f обмотки возбуждения, приведенным к статору [1].

$$\Phi_f = \Phi_{\sigma f} + \Phi_d = I_f (x_{\sigma f} + x_{ad}) = I_f x_f, \quad (4.5)$$

где $x_{\sigma f}$ – реактивность рассеяния обмотки возбуждения; x_{ad} – индуктивное сопротивление реакции статора по оси d ; $x_f = x_{\sigma f} + x_{ad}$ – полная индуктивность обмотки возбуждения.

Полезный поток $\Phi_d = I_f x_{ad}$ при вращении ротора обуславливает в статорной цепи синхронную электродвижущую силу E_q . В системе относительных единиц

$$\Phi_{d^*} = E_{q^*}.$$

В ненасыщенной машине поток $\Phi_{\sigma f}$ составляет некоторую постоянную долю потока Φ_f , которая характеризуется коэффициентом рассеяния обмотки возбуждения

$$\sigma_f = \frac{\Phi_{\sigma f}}{\Phi_f} = \frac{x_{\sigma f}}{x_f} = \frac{x_{\sigma f}}{x_{\sigma f} + x_{ad}}. \quad (4.6)$$

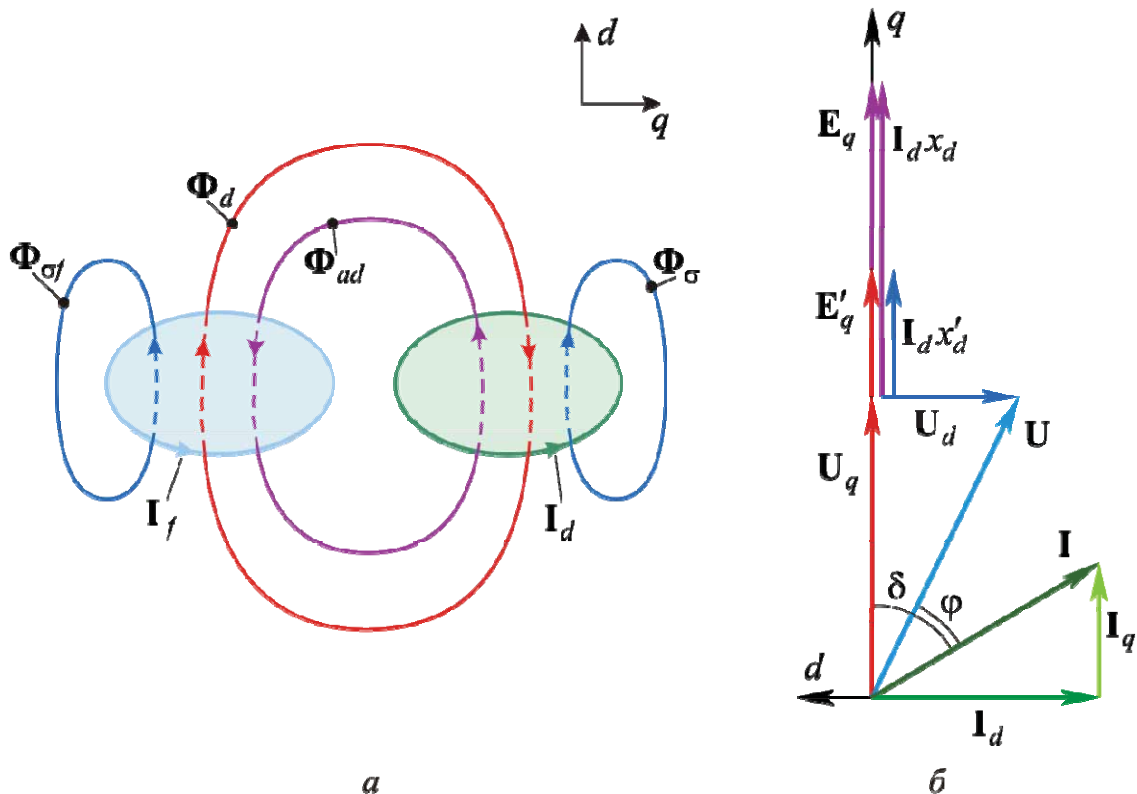


Рис. 4.4: а – составляющие потоков по оси d синхронной машины в установившемся режиме; б – векторная диаграмма явнополюсной СМ в рабочем режиме

При замкнутой цепи статора в установившемся режиме по ней протекает неизменный по амплитуде ток \mathbf{I} , который может быть разложен на продольную \mathbf{I}_d и поперечную \mathbf{I}_q составляющие. Ток \mathbf{I}_d (поскольку рассматриваются потоки только по оси d) создает поток реакции статора $\Phi_{ad} = \mathbf{I}_d x_{ad}$, который пронизывает обмотку возбуждения. В соответствии с этим полное потокосцепление обмотки возбуждения в нагрузочном режиме определяется выражением*

$$\Psi_{f\Sigma} = \Phi_f - \Phi_{ad}. \quad (4.7)$$

Благодаря магнитной связи между обмотками статора и ротора при внезапном изменении тока статорной цепи на $\Delta \mathbf{I}_d$ в обмотке возбуждения индуцируется постоянный (апериодический) ток $\Delta \mathbf{I}_f$ такой величины, что результирующее потокосцепление обмотки возбуждения $\Psi_{f\Sigma}$ остается неизменным. Это условие является следствием закона Ленца. Физически это означает, что в начальный момент КЗ потоки $\Phi_{f(0)}$ и $\Phi_{ad(0)}$ можно представить как их значения в нормальном режиме (Φ_f и Φ_{ad}) плюс соответствующие им приращения $\Delta \Phi_{f(0)}$ и $\Delta \Phi_{ad(0)}$, обусловленные токами $\Delta \mathbf{I}_f$ и $\Delta \mathbf{I}_d$. Однако приращения указанных потоков компенсируют друг друга так, что

$$\Delta \Phi_{f(0)} - \Delta \Phi_{ad(0)} = 0,$$

оставляя неизменным результирующее потокосцепление обмотки возбуждения ($\Psi_{f\Sigma}$) согласно выражению (4.7).

Для решения ранее сформулированной задачи (нахождение параметров синхронной машины для начального момента нарушения режима) воспользуемся неизменностью потокосцепления $\Psi_{f\Sigma}$. Отметим, что часть потока $\Psi_{f\Sigma}$, определяемая коэффициентом σ_f , остается связанной только с обмоткой возбуждения. Зная коэффициент рассеяния σ_f , выделим ту часть $\Psi_{f\Sigma}$, которая взаимодействует со статором:

$$\Psi'_d = (1 - \sigma_f) \Psi_{f\Sigma}, \text{ где } 1 - \sigma_f = x_{ad} / x_f. \quad (4.8)$$

Именно это потокосцепление Ψ'_d и обусловленная им ЭДС в обмотке статора E'_q сохраняют в начальный момент переходного процесса свои предшествующие значения.

* Здесь и далее записаны скалярные выражения, в которых учтены фазы векторов.

Придадим выражению (4.8) более наглядный вид:

$$\begin{aligned}\Psi'_d &= \frac{x_{ad}}{x_f} (\Phi_f - \Phi_{ad}) = \frac{x_{ad}}{x_f} (I_f x_{ff} - I_d x_{ad}) = I_f x_{ad} - I_d \frac{x_{ad}^2}{x_f} = \\ &= E_q - I_d \frac{x_{ad}^2}{x_f} = (U_q + I_d x_d) - I_d \frac{x_{ad}^2}{x_f} = U_q + I_d \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \right) = E'_q.\end{aligned}$$

В окончательной форме выражение для E'_q запишется так:

$$E'_q = U_q + I_d x'_d, \quad (4.9)$$

где
$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} = x_\sigma + x_{ad} // x_{\sigma f} \quad (4.10)$$

– *продольная переходная реактивность*, величина паспортная; x_σ – реактивность рассеяния статорной обмотки; E'_q – *переходная ЭДС* (располагается по оси q СМ).

Термины «переходная ЭДС», «переходная реактивность» следует относить к тому, что E'_q вместе с x'_d позволяют оценить переход от нормального режима к режиму короткого замыкания. Отметим, что указанные параметры (E'_q, x'_d) характеризуют СМ без демпферных обмоток. Следует особо подчеркнуть, что начальное значение $E'_{q(0)}$, согласно выражению (4.9), определяется по параметрам U_{q0} и I_{d0} , с которыми машина работала до нарушения режима. В этом смысле $E'_{q(0)}$ называют расчетной, поскольку ее нельзя измерить. Неизменность E'_q при $t = 0$ определяет ее практическую ценность и позволяет рассчитывать начальное значение периодической слагаемой тока переходного режима. В дальнейшем, при $t > 0$, E'_q изменяется до значения, соответствующего новому установившемуся режиму машины (см. рис. 4.6).

На рис. 4.4, б приведена векторная диаграмма явнополусной машины, работающей в нагрузочном режиме с отстающим током. Вектор E'_q совпадает с вектором E_q и меньше его на величину падения напряжения $I_d(x_d - x'_d)$.

Непосредственно из структуры выражения (4.10) следует, что переходному сопротивлению x'_d соответствует схема замещения машины, изображенная на рис. 4.5, в. Оказывается, эта схема может быть получена иным путем – посредством эквивалентного преобразования магнитно связанных цепей.

На рис. 4.5, а приведена принципиальная схема СМ (без демпферных обмоток) в продольной оси d , содержащая две магнитно связанные обмотки – возбуждения и статора. В контур обмотки возбуждения введена ЭДС E_{qf} , отвечающая ее результирующему потокоцеплению $\Psi_{f\Sigma}$. Заменяя магнитную связь указанных контуров эквивалентной электрической, получаем схему замещения машины (рис. 4.5, б), которая аналогична схеме замещения двухобмоточного трансформатора. После замены активной ветви с $x_{\sigma f}$, E_{qf} и пассивной с x_{ad} одной эквивалентной получаем схему (рис. 4.5, в), где, как и следовало ожидать, машина представлена своими переходными параметрами E'_q и x'_d .

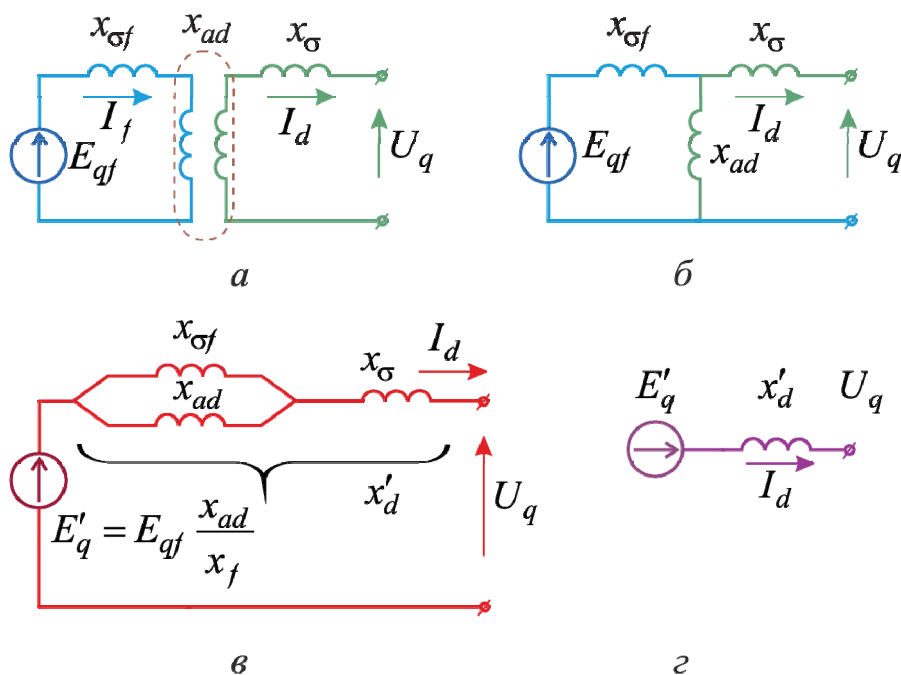


Рис. 4.5. К определению переходной ЭДС и реактивности машины в продольной оси: а – исходная принципиальная схема; б, в – двухконтурные схемы замещения; г – эквивалентная одноконтурная схема замещения для расчета переходного режима

В поперечной оси q синхронной машины расположена только статорная обмотка (см. рис. 4.1, в), поэтому в начальный момент нарушения режима она характеризуется такими же параметрами, что и в установившемся режиме:

$$E'_d = 0, \quad x'_q = x_q. \quad (4.11)$$

Таким образом, при КЗ в статорной цепи за внешней реактивностью $x_{вн}$ начальное значение периодической слагаемой тока переходного режима (начальный переходный ток) будет только продольным:

$$I_{d(0)} = \frac{E'_{q0}}{x'_d + x_{\text{BH}}} = I_{\text{П}(0)}.$$

Переходная реактивность (x'_d) в среднем на порядок меньше синхронной (x_d) и составляет $x'_d = 0,15 \dots 0,37$ для неявнополюсных машин и для явнополюсных $x'_d = 0,2 \dots 0,5$.

Переходная ЭДС, рассчитанная по номинальным параметрам генератора, в о. е. в среднем составляет: $E'_q \approx 1,09$; соответствующая ей синхронная – $E_q = 2,15$.

На рис. 4.6 представлены закономерности изменения характерных параметров (синхронной и переходной ЭДС, напряжения и тока статорной цепи) синхронного генератора без автоматического регулирования возбуждения в переходном режиме (левая часть рисунка является продолжением правого по вертикальной оси). Поясним поведение указанных параметров, исходя из физики явлений.

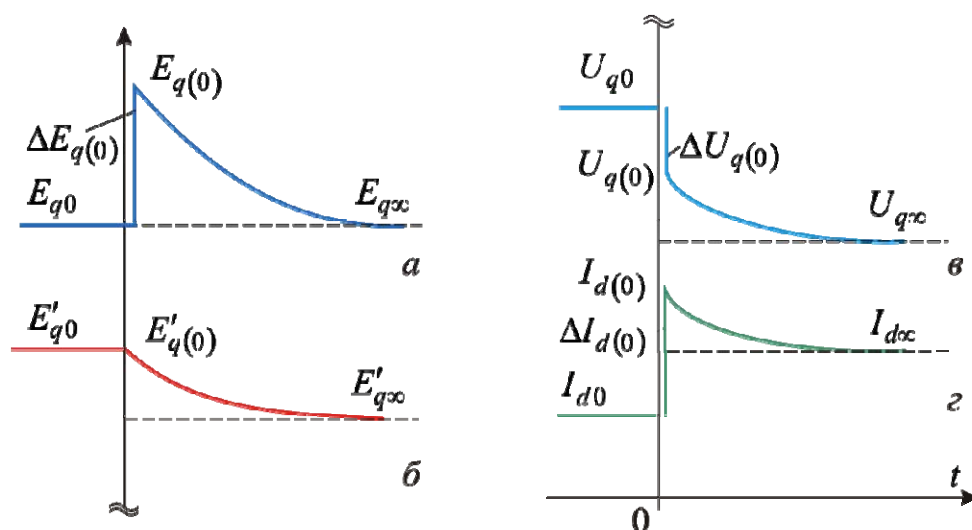


Рис. 4.6. Изменение параметров в продольной оси СМ в переходном режиме: а – синхронной ЭДС E_q ; б – переходной ЭДС E'_q ; в – напряжения генератора U_q ; г – периодического тока статора I_d

Синхронная ЭДС (рис. 4.6, а), обусловленная в нормальном режиме током возбуждения I_{f0} , равна E_{q0} . При коротком замыкании в цепи статора внешнее сопротивление уменьшается, а вынужденный периодический ток I_{d0} (рис. 4.6, г) скачкообразно возрастает на величину $(I_{d\infty} - I_{d0})$. Этот скачок тока индуцирует в обмотке возбуждения

постоянный ток $\Delta \mathbf{I}_{f(0)}$, совпадающий по знаку с основным током возбуждения \mathbf{I}_{f0} . Следствием этого является скачкообразное возрастание синхронной ЭДС на величину $\Delta \mathbf{E}_{q(0)}$:

$$E_{q(0)} = E_{q0} + \Delta E_{q(0)},$$

как показано на рис. 4.6, а.

С течением времени дополнительный ток цепи возбуждения ($\Delta \mathbf{I}_f$) затухает по закону экспоненты, вызывая аналогичное изменение приращения синхронной электродвижущей силы ($\Delta \mathbf{E}_q$). В новом установившемся режиме короткого замыкания ток $\Delta \mathbf{I}_f$ равен нулю, а синхронная ЭДС – своему предшествующему значению в нормальном режиме: $\mathbf{E}_{q\infty} = \mathbf{E}_{q0}$.

Составляющая напряжения генератора по оси q (\mathbf{U}_{q0}) в момент нарушения режима претерпевает скачкообразное снижение (см. рис. 4.6, в). Величина скачка тем больше, чем ближе место повреждения к генератору. В пределе, когда на клеммах генератора происходит трехфазное короткое замыкание, первоначальное снижение численно равно напряжению в предшествующем режиме, и, следовательно, напряжение в этом случае равно нулю. При средней удаленности короткого замыкания изменение напряжения \mathbf{U}_q в переходном режиме будет таким, как показано на рис. 4.6, в.

Периодический ток цепи статора после скачкообразного возрастания с течением времени затухает до установившегося значения ($\mathbf{I}_{d\infty}$). Такой характер изменения является следствием затухания апериодической составляющей тока $\Delta \mathbf{I}_f$ цепи возбуждения.

Итак, синхронная ЭДС, равно как и напряжение генератора, в момент короткого замыкания скачкообразно изменяются. Величины этих скачков зависят от искомого тока $\mathbf{I}_{d(0)}$ переходного режима, и поэтому ни синхронная ЭДС (\mathbf{E}_{q0}), ни напряжение генератора нормального режима (\mathbf{U}_{q0}) не могут быть использованы для расчета тока $\mathbf{I}_{d(0)}$.

Переходная ЭДС $\mathbf{E}'_{q(0)}$ в начальный момент внезапного нарушения режима остается неизменной и равной своему значению в предшествующем режиме \mathbf{E}'_{q0} . Это, как отмечалось ранее, позволяет использовать ее для расчета периодической слагаемой тока переходного режима.

4.4. Сверхпереходные ЭДС и реактивности синхронной машины

Установим параметры, которыми характеризуются машины с демпферными обмотками в момент внезапного нарушения режима.

Полагаем, что помимо обмотки возбуждения на роторе имеется по одной демпферной обмотке в продольной и поперечной осях. Наличие демпферных обмоток не обеспечивает электромагнитной симметрии машины, что вынуждает определять ее параметры отдельно в продольной и поперечной осях.

Для решения поставленной задачи, как и ранее, опираемся на принцип Ленца применительно к магнитно-связанным контурам. Для упрощения выкладок воспользуемся возможностью замены таких цепей эквивалентной электрической схемой, аналогичной схеме трансформатора.

В продольной оси d синхронного генератора располагаются три обмотки (см. рис. 4.7, a): статора, контура возбуждения и продольная демпферная. С целью упрощения решения поставленной задачи считаем, что обмотка статора и обе обмотки ротора в его продольной оси связаны между собой общим потоком взаимоиנדукции Φ_{ad} , которому соответствует взаимный реактанс x_{ad} . В установившемся режиме демпферные обмотки себя не проявляют, поскольку не содержат собственных источников ЭДС. По этой причине результирующее потокосцепление обмотки возбуждения в нормальном режиме будет тем же, что и у машины без демпферных обмоток, т. е. $\Psi_{f\Sigma}$ в соответствии с выражением (4.7). Результирующее потокосцепление продольной демпферной обмотки $\Psi_{1d\Sigma}$ определяется векторной суммой полезного потока $\Phi_d = \mathbf{I}_f x_{ad}$ и ответной реакцией статора $\Phi_{ad} = \mathbf{I}_d x_{ad}$, что в скалярном выражении запишется так:

$$\Psi_{1d\Sigma} = \Phi_d - \Phi_{ad}. \quad (4.12)$$

На рис. 4.7, a приведена принципиальная схема машины с тремя магнитно связанными контурами. В контур обмотки возбуждения введена ЭДС E_{qf} , отвечающая ее результирующему потокосцеплению $\Psi_{f\Sigma}$, а в контур продольной демпферной обмотки – E_{q1d} , соответствующая потокосцеплению $\Psi_{1d\Sigma}$. Электрическая схема замещения синхронного генератора (см. рис. 4.7, b) аналогична схеме замещения трехобмоточного трансформатора. Она содержит три параллельные ветви, две из которых – это обмотка возбуждения и продольная демпферная обмотка – являются активными с параметрами E_{qf} , $x_{\sigma f}$ и E_{q1d} , $x_{\sigma 1d}$,

а одна – пассивной – с реактансом x_{ad} . Ее эквивалентное преобразование (рис. 4.7, в) приводит к E''_q и x''_d .

Непосредственно из схемы (рис. 4.7, в) имеем

$$E''_{q(0)} = U_{q0} + I_{d0}x''_d, \quad (4.13)$$

где E''_q – сверхпереходная ЭДС в поперечной оси;

$$x''_d = x_\sigma + x_{\sigma f} // x_{\sigma 1d} // x_{ad}, \quad (4.14)$$

x''_d – сверхпереходная реактивность в продольной оси; $x_{\sigma 1d}$ – реактанс рассеяния продольной демпферной обмотки.

Сверхпереходная ЭДС E''_q в начальный момент переходного режима сохраняет свое значение неизменным, что и определяет ее практическую ценность. Она является величиной расчетной и определяется параметрами нормального режима (U_{q0}, I_{d0}).

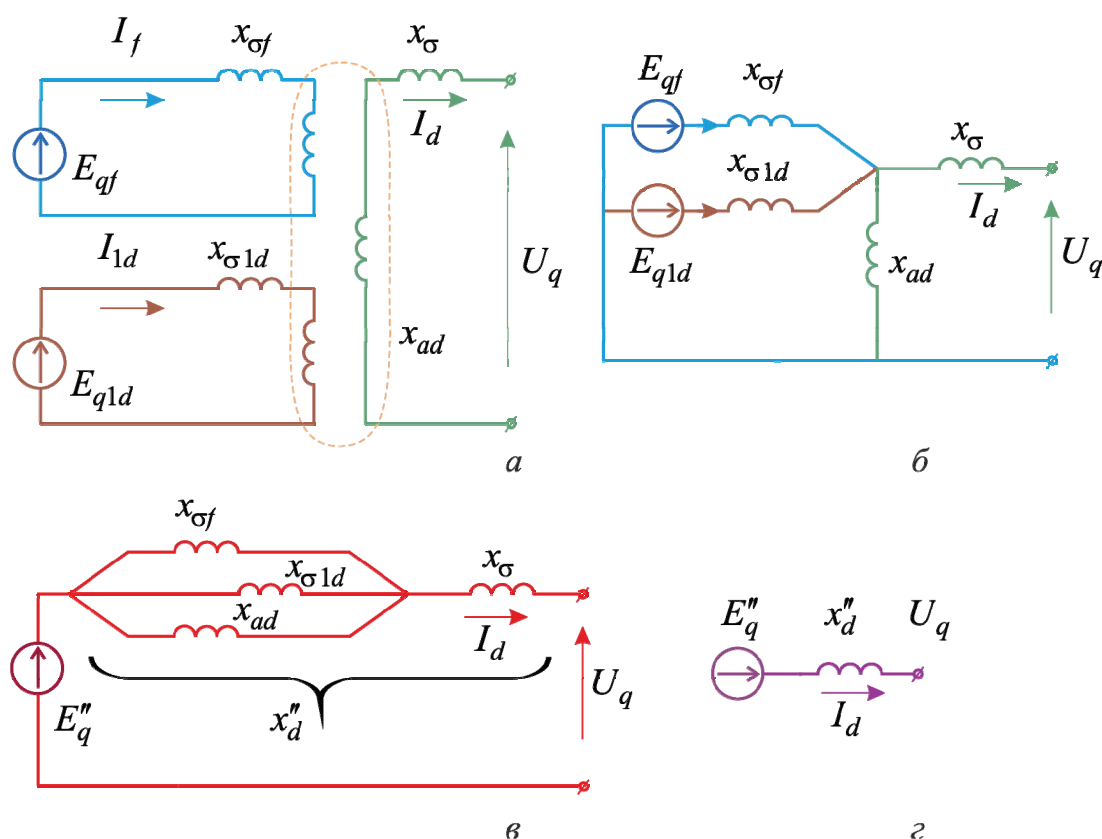


Рис. 4.7. К определению сверхпереходных параметров СМ в оси d: а – исходная принципиальная схема; б, в – схемы замещения; г – эквивалентная одноконтурная схема замещения в продольной оси для расчета переходного режима

В поперечной оси q рассматриваемой машины взаимодействуют два контура: обмотка статора и поперечная демпферная обмотка (рис. 4.8, *a*). Их взаимодействие определяется потоком взаимоиндукции Φ_{aq} , которому соответствует реактивность x_{aq} . Результирующее потокосцепление поперечной демпферной обмотки определяется только ответной реакцией статора, т. е.

$$\Psi_{1q\Sigma} = \Phi_{aq} = I_q x_{aq}.$$

Электрические схемы замещения машины в поперечной оси и двухобмоточного трансформатора одинаковы (рис. 4.8, *б*). После упрощения (рис. 4.8, *в*) схема дает интересующие параметры E_d'' и x_q'' , которые определяются выражениями:

$$E_{d(0)}'' = U_{d0} - I_{q0} x_q''; \quad (4.15)$$

$$x_q'' = x_\sigma + x_{\sigma 1q} // x_{aq}, \quad (4.16)$$

где E_d'' – *сверхпереходная ЭДС в продольной оси*, определяемая параметрами нормального режима (U_{d0} , I_{q0}); x_q'' – *сверхпереходная реактивность в поперечной оси* (паспортная величина); $x_{\sigma 1q}$ – реактанс рассеяния поперечной демпферной обмотки.

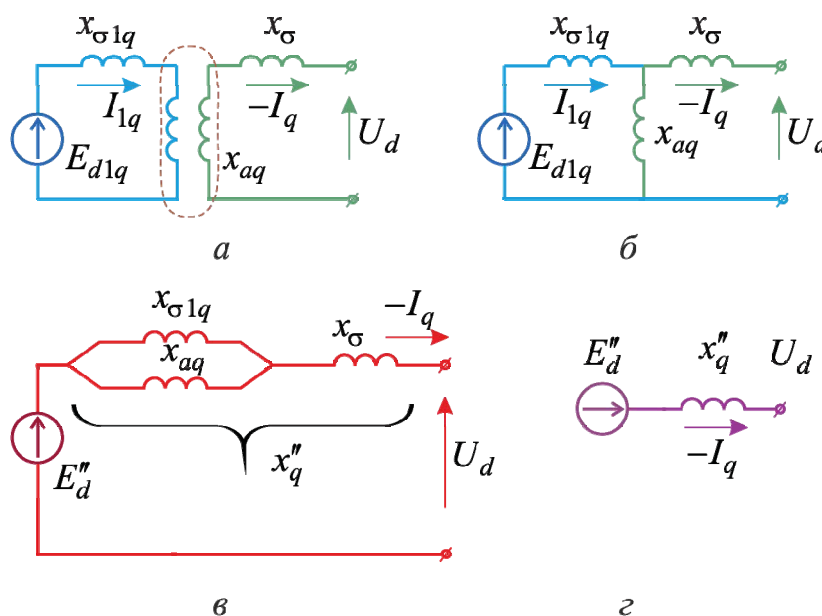


Рис. 4.8. К определению сверхпереходных параметров СМ в оси q :
a – исходная принципиальная схема; *б, в* – схемы замещения;
г – эквивалентная одноконтурная схема замещения в поперечной оси
 для расчета переходного режима

ЭДС – E''_q и E''_d – сохраняют свои значения неизменными в начальный момент нарушения режима, а в схеме замещения для расчета переходного режима им соответствуют сопротивления x''_d и x''_q . Приставка «сверх» в термине «сверхпереходные» указывает на то, что данные параметры СМ учитывают влияние демпферных контуров.

Для явнополюсной синхронной машины с демпферными обмотками, работающей с отстающим током, на рис. 4.9 приведена векторная диаграмма. На ней в координатах d, q показаны составляющие напряжения U_q и U_d , падения напряжений на сверхпереходных реактивностях $I_{d0}x''_d$ и $-I_{q0}x''_q$, поперечная и продольная сверхпереходные электродвижущие силы E''_q, E''_d и полная величина этой ЭДС.

При чисто индуктивной цепи статора продольная и поперечная составляющие начального значения сверхпереходного тока определяются выражениями:

$$I''_d = E''_q / (x''_d + x_{вн});$$

$$I''_q = E''_d / (x''_q + x_{вн})$$

и его полная величина

$$I'' = \sqrt{(I''_d)^2 + (I''_q)^2}.$$

Сопротивления x''_d и x''_q являются характерными параметрами машины и наряду с другими приводятся в ее паспортных данных. Для современных генераторов сверхпереходная реактивность $x''_d \approx 0,14 \dots 0,27$, и несколько меньше x''_q и x'_d . Строго говоря, различие реактивностей x''_d и x''_q требует отдельного нахождения составляющих I''_d, I''_q и полного сверхпереходного тока I'' . В практических расчетах токов короткого замыкания считают $x''_d = x''_q$, что позволяет отказаться от разложения E'', I'' по осям d и q синхронной машины и существенно упрощает расчет. Это допущение не приводит к сколько-либо ощутимой погрешности.

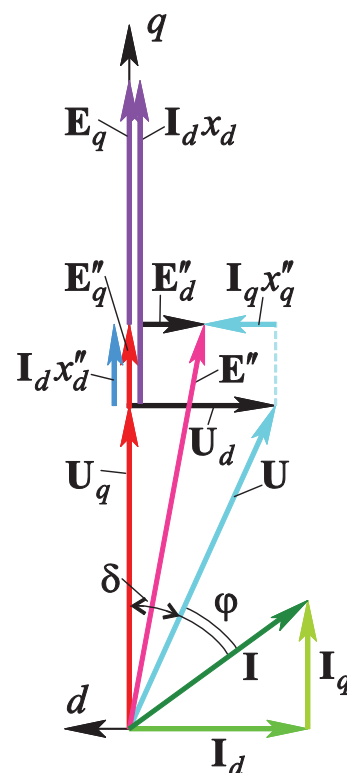


Рис. 4.9. Векторная диаграмма СМ с демпферными обмотками

4.5. Уравнения переходного процесса синхронной машины

Переходный процесс в синхронной машине может быть описан системой дифференциальных уравнений. При выводе этих уравнений приходится принимать ряд допущений в отношении сложно учитываемых факторов:

- отсутствие потерь в магнитной системе;
- магнитная система ненасыщенна, в силу этого индуктивности машины не зависят от токов;
- в воздушном зазоре действуют только первые гармоники намагничивающей силы и индукции, при этом ЭДС статора являются синусоидами основной частоты;
- конструктивная симметрия статорных обмоток относительно фазных осей A , B , C и ротора – относительно продольной d и поперечной q осей.

На рис. 4.10 представлена принципиальная схема синхронной явнополюсной машины без демпферных обмоток, где стрелками указаны принятые положительные направления токов и напряжений, а также координатных осей статора (A , B , C) и ротора (d , q).

Рассматриваемая машина содержит четыре магнитно связанных контура: три контура фаз статора и контур обмотки возбуждения. Запишем дифференциальные уравнения равновесия ЭДС и падений напряжений. Уравнения статорных контуров записываются в неподвижных координатах фаз A , B , C , имеющих сдвиг в 120° , а обмотки возбуждения – в подвижной прямоугольной системе координат ротора d , q :

$$U_A = -\frac{d\Psi_A}{dt} - ri_A, U_B = -\frac{d\Psi_B}{dt} - ri_B, U_C = -\frac{d\Psi_C}{dt} - ri_C; \quad (4.17)$$

$$U_f = \frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f, \quad (4.18)$$

где U_A , U_B , U_C – мгновенные значения фазных напряжений; Ψ_A , Ψ_B , Ψ_C , Ψ_f – результирующие потокосцепления обмоток статора и обмотки возбуждения; r , r_f – активные сопротивления обмоток статора и цепи возбуждения.

Знак «-» перед производной результирующих потокосцеплений фаз статора Ψ поставлен в соответствии с правилом Ленца.

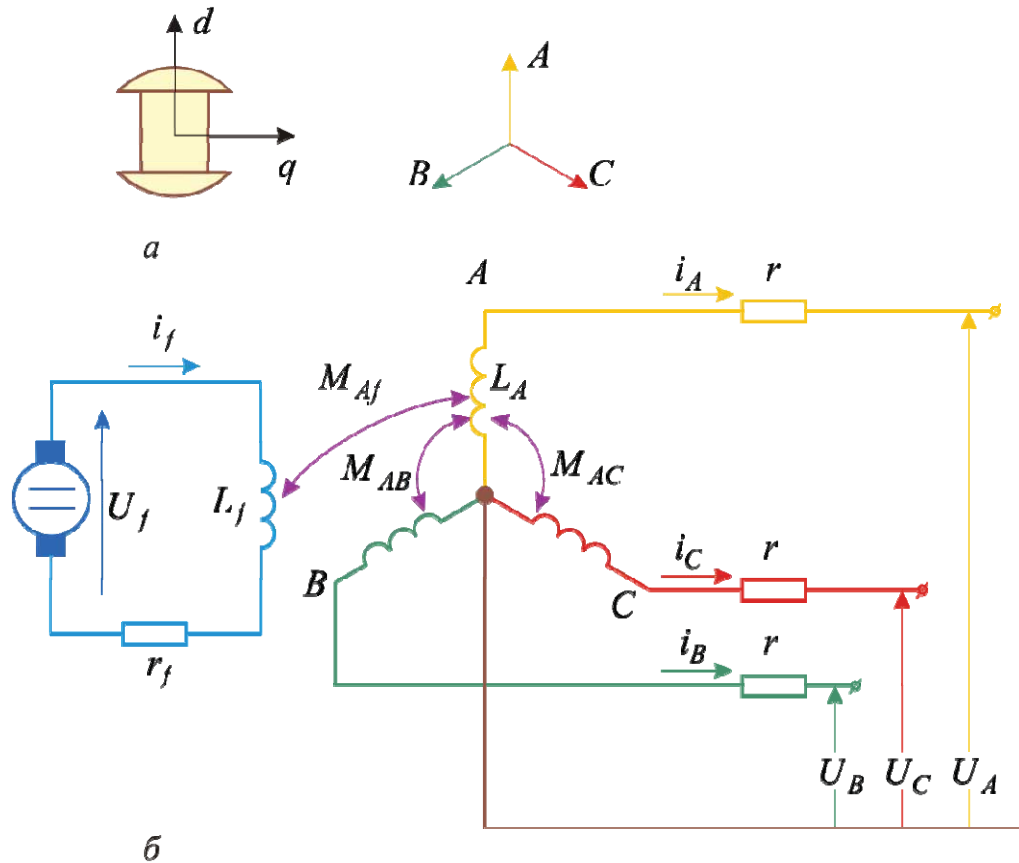


Рис. 4.10. Система координат синхронной машины:

а – положительные направления магнитных осей ротора и фазных обмоток статора;
б – положительные направления токов и напряжений контуров синхронной машины

Раскроем выражения для потокоцеплений, которые при принятых допущениях представляют собой линейные зависимости от тока рассматриваемого контура и токов магнитно связанных с ним контуров. Коэффициентами пропорциональности при этом являются собственная индуктивность L данного контура и его взаимные индуктивности M с другими контурами. Введя у L и M соответствующие индексы, можно записать, что

$$\left. \begin{aligned} \Psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f; \\ \Psi_B &= M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f; \\ \Psi_C &= M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Cf} i_f; \\ \Psi_f &= M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f. \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

Здесь $M_{AB} = M_{BA}$, $M_{fB} = M_{Bf}$ и т. д.

Системы (4.17), (4.18) состоят из линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, за исключением собствен-

ной индуктивности L_f обмотки возбуждения, которая является постоянной величиной. Они зависят от положения ротора относительно обмоток статора, что создает принципиальную сложность в решении исходной дифференциальной системы уравнений. Выясним закономерности изменения индуктивностей синхронной машины, считая, что относительное положение магнитной оси фазы A и продольной оси ротора d характеризуется углом γ (см. рис. 4.12).

Взаимные индуктивности M_{Af} , M_{Bf} , M_{Cf} зависят от положения ротора (γ). Принятое допущение о синусоидальности наводимых в статоре ЭДС указывает на закономерности их изменения. Взаимная индуктивность M_{Af} получается максимальной и равной M_d при $\gamma = 0$. Она выражается синусоидальной функцией с периодом 2π

$$M_{Af} = M_{fA} = M_d \cos \gamma;$$

для фаз B и C необходимо принимать аргументы $(\gamma - 120^\circ)$ и $(\gamma + 120^\circ)$.

Собственная индуктивность фаз L_A , L_B , L_C зависит от положения ротора (γ). Она получается наибольшей для любой из фаз, когда продольная ось ротора совпадает с магнитной осью соответствующей фазы статора, и наименьшей, когда эти оси перпендикулярны ($\gamma = 90^\circ$). Следовательно, собственная индуктивность изменяется гармонически с периодом π , т. е. с двойной частотой, и не зависит от направления вращения ротора. В частности, для фазы A имеем

$$L_A = l_0 + l_2 \cos 2\gamma. \quad (4.20)$$

Фазам B и C соответствуют аргументы $(2\gamma + 120^\circ)$ и $(2\gamma - 120^\circ)$.

Взаимная индуктивность фаз статора M_{AB} , M_{AC} , M_{BC} является величиной отрицательной и достигает наименьшего абсолютного значения, когда ось d совпадает с биссектрисой угла, образованного осями фаз статора. Она изменяется гармонически с периодом π и между фазами A и B определяется выражением

$$M_{AB} = m_0 + m_2 \cos(2\gamma - 120^\circ). \quad (4.21)$$

Взаимной индуктивности фаз B и C соответствует аргумент 2γ , а фаз A и C – аргумент $(2\gamma + 120^\circ)$.

Коэффициенты в (4.20), (4.21) можно выразить через индуктивности, которыми обычно характеризуется синхронная машина [11]. В относительных единицах эта взаимосвязь имеет следующий вид:

$$l_0 = \frac{1}{3}(L_d + L_q + L_0), \quad m_0 = \frac{1}{3}\left(L_0 - \frac{L_d + L_q}{2}\right);$$

$$l_2 = m_2 = \frac{1}{3}(L_d - L_q).$$

Исходная система дифференциальных уравнений (4.17), (4.18), с учетом найденных закономерностей для собственных и взаимных индуктивностей имеет переменные во времени коэффициенты. По этой причине решение дифференциальных уравнений не может быть найдено в элементарных функциях.

Выход для этой ситуации предложили Р.Х. Парк и А.А. Горев. Основная идея их предложения заключается в замене трехфазной машины эквивалентной двухфазной, что соответствует переходу от трехосной (A, B, C) к двухосной (d, q) системе координат. Вторым, наиболее важным, моментом является то, что двухосевая система координат должна быть расположена не на статоре, а предполагается жестко связанной с ротором. Это равносильно замене трех неподвижных обмоток статора двумя обмотками, вращающимися вместе с ротором. Так как указанные фазные обмотки, расположенные в осях d и q , неподвижны относительно роторной обмотки, все индуктивности такой машины постоянны. Это позволяет заменить исходную систему дифференциальных уравнений новой с постоянными коэффициентами, решение которой не представляет принципиальных сложностей. Указанное преобразование наиболее просто осуществляется с использованием обобщенного вектора трехфазной системы (см. рис. 4.11).

Мгновенное значение любой синусоидальной величины можно представить в виде проекции вращающегося вектора на неподвижную ось времени. Если речь идет о трехфазной системе, то в этом случае проекции симметричной «звезды» трех векторов на единую ось времени дают мгновенные значения фазных величин (см. рис. 4.11, *а*). Однако последние можно получить, проецируя единый вектор на три оси времени, которые совпадают с магнитными осями соответствующих фаз (см. рис. 4.11, *б*). Такой вектор называется *обобщенным вектором трехфазной системы*. При его вращении в ту же сторону, что и системы трех векторов, чередование осей времени фаз нужно изменить на противоположное. При симметричном установившемся режиме обобщенный вектор вращается с неизменной синхронной скоростью и постоянен по абсолютной величине. Обобщенным вектором можно характеризовать любые фазные переменные (U, I, Ψ) .

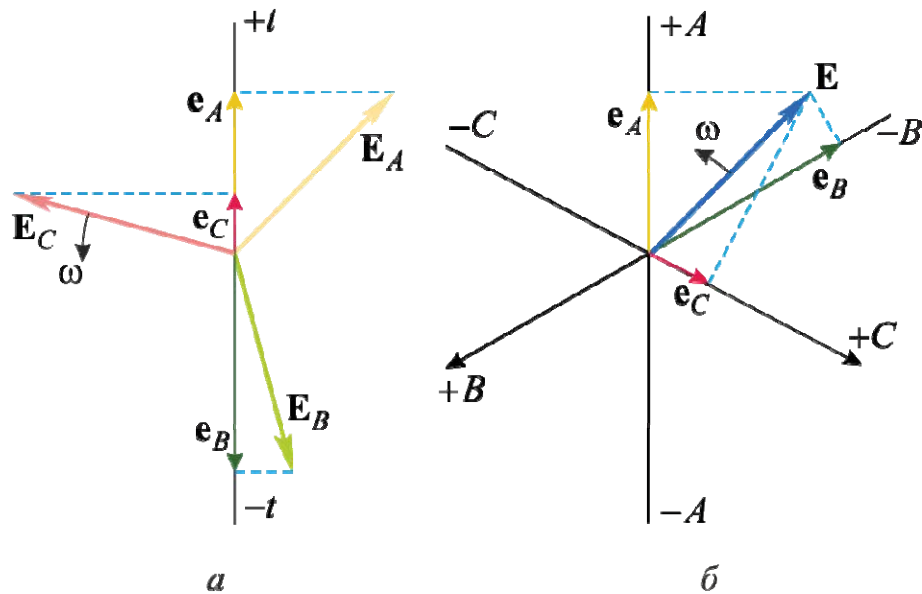


Рис. 4.11. К определению мгновенных значений векторов напряжений на основе трехфазной системы (а) и на основе обобщенного вектора (б)

Произведем замену переменных. Для этого выразим величины фаз статора (I, U, Ψ) через соответствующие величины в координатах d, q , вращающихся вместе с ротором. Воспользуемся диаграммой (см. рис. 4.12), где через A, B, C обозначены неподвижные координаты фаз статора (фазные оси времени), через \mathbf{I} – обобщенный вектор тока.

Проекция вектора \mathbf{I} на ось A дает i_A , а на оси d и q – соответственно i_d и i_q . Проецируя токи i_d и i_q на ось A , находим интересующую связь между фазным током и токами в новой системе координат:

$$i_A = i_{dA} + i_{qA} = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma, \quad (4.22)$$

что отражает сущность замены переменных.

Току фазы B соответствует аргумент $(\gamma - 120^\circ)$, и току фазы C – аргумент $(\gamma + 120^\circ)$.

Преобразования были сделаны с предположением, что трехфазная система являлась уравновешенной, т. е.

$$i_A + i_B + i_C = 0.$$

Если нейтраль заземлена, и указанные условия не выполняются, то следует ввести дополнительное соотношение, известное из теории симметричных составляющих для токов нулевой последовательности:

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_A + i_B + i_C). \quad (4.23)$$

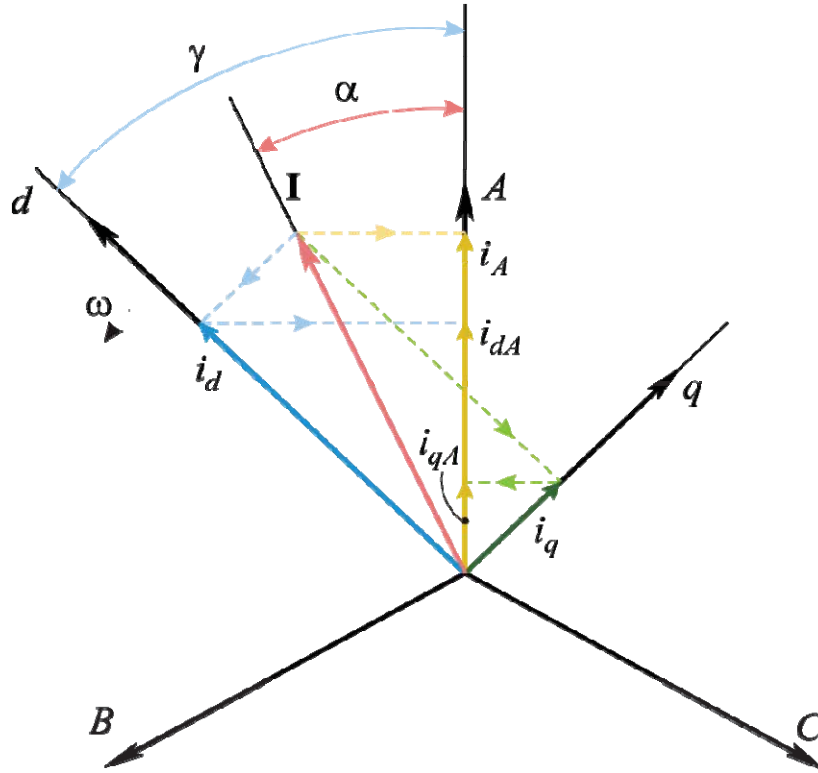


Рис. 4.12. Связь параметров (токов) неподвижной системы координат A, B, C с подвижной d, q

Нулевая составляющая тока i_0 во всех фазах одинакова по величине и направлению. Однако фазы статора сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 120° . Поэтому i_0 не влияет ни на обобщенный вектор, ни на его проекции на оси d и q . В соответствии со сказанным для общего случая при переходе к фазным переменным учтем в выражении (4.22) нулевую составляющую тока:

$$i_A = i_0 + i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma. \quad (4.24)$$

Обратимся к преобразованию уравнений (4.17) путем замены фазных переменных i_A, U_A, Ψ_A их составляющими в координатах $d, q, 0$.

В соответствии со структурой выражения (4.24) представим напряжение и потокосцепление фазы A через новые переменные:

$$\left. \begin{aligned} U_A &= U_0 + U_d \cos \gamma + U_q \sin \gamma; \\ \Psi_A &= \Psi_0 + \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

Подставляя ток i_A согласно (4.24), а U_A, Ψ_A из выражений (4.25) в первое уравнение (4.17) и имея в виду при дифференцировании, что Ψ_d, Ψ_q и γ являются функциями времени t , получим

$$\begin{aligned}
U_0 + U_d \cos \gamma + U_q \sin \gamma &= -\frac{d}{dt}(\Psi_0 + \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma) - \\
-r(i_0 + i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma) &= -\frac{d\Psi_0}{dt} - \frac{d\Psi_d}{dt} \cos \gamma + \Psi_d \sin \gamma \frac{d\gamma}{dt} - \\
-\frac{d\Psi_q}{dt} \sin \gamma - \Psi_q \cos \gamma \frac{d\gamma}{dt} &- ri_0 - ri_d \cos \gamma - ri_q \sin \gamma.
\end{aligned}$$

После перегруппировки слагаемых это выражение можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
&\left(U_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + ri_d \right) \cos \gamma + \\
+ \left(U_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + ri_q \right) \sin \gamma &+ \left(U_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} + ri_0 \right) = 0. \quad (4.26)
\end{aligned}$$

Уравнение (4.26) должно быть удовлетворено при любом значении γ , что возможно только при условии, что каждое из выражений, заключенных в скобки, тождественно равно нулю. Следовательно, одно уравнение (4.26) распадается на три:

$$U_d = -\frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} - ri_d; \quad (4.27)$$

$$U_q = -\frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} - ri_q; \quad (4.28)$$

$$U_0 = -\frac{d\Psi_0}{dt} - ri_0. \quad (4.29)$$

Результат преобразования не изменится, если вместо фазы A рассматривать иную фазу.

Уравнение (4.18) для обмотки возбуждения остается неизменным:

$$U_f = \frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f.$$

В уравнениях (4.27)–(4.29) для системы относительных единиц потокосцепления определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned}
\Psi_d &= M_d i_f + L_d i_d = x_{ad} i_f + x_d i_d; \\
\Psi_q &= L_q i_q = x_q i_q; \\
\Psi_0 &= L_0 i_0 = x_0 i_0,
\end{aligned} \right\}$$

где x_{ad} , x_d , x_q являются известными реактивностями, которыми характеризуется синхронная машина в продольной и поперечной осях для действующих значений токов; L_0 , x_0 – индуктивность и индуктивное сопротивление нулевой последовательности.

Таким образом, переход к новым переменным в координатах $d, q, 0$ позволил получить систему дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Уравнения (2.27)–(2.29) называют *уравнениями Парка–Горева*. Наглядную физическую интерпретацию составляющим уравнений Парка–Горева можно дать, прибегнув к понятию обобщенного вектора потокосцепления. В переходном режиме последний вращается со скоростью, отличной от синхронной, и изменяется по величине. Поэтому первые слагаемые этих уравнений – $d\Psi_d/dt$, $d\Psi_q/dt$, $d\Psi_0/dt$ – представляют ЭДС *трансформации*, т. к. они определяются изменением соответствующих потокосцеплений во времени. Вторые слагаемые – $\Psi_d d\gamma/dt$, $\Psi_q d\gamma/dt$ – обусловлены перемещением (вращением) потокосцеплений, их называют ЭДС *вращения*.

Пользуясь допущением о неизменности синхронной скорости ротора в переходном режиме, имеем

$$\gamma = \omega_0 t + \gamma_0.$$

Следовательно, $d\gamma/dt = \omega_0$, и в относительных единицах при $\omega_0 = \omega_0$ имеем $d\gamma/dt = 1$.

Примеры исследования переходного процесса синхронной машины на базе уравнений Парка–Горева приведены в [1, 11].

4.6. Переходный процесс синхронного генератора при трехфазном КЗ

Синхронные генераторы как основной источник питания электрической системы во многом определяют ее режим. В то же время в силу конструктивных особенностей они являются наиболее сложным элементом электрической системы с точки зрения математического описания и анализа переходных режимов. В переходном режиме наряду с вынужденными токами возникают свободные токи. Затухание свободных токов определяется постоянными времени, зависящими от параметров синхронного генератора. Их расчетные выражения, как известно, находятся из характеристического уравнения $D(p) = 0$.

Для генератора без демпферных обмоток это уравнение имеет третью степень, при их наличии – пятую. Строгое решение таких уравнений в общем виде невозможно. Для качественного анализа переходного процесса для определения постоянных времени приходится делать ряд допущений, что позволяет получить упрощенные выражения и вскрыть физическую сущность явлений. С целью упрощения выкладок мы будем избегать строгого математического анализа, обращая основное внимание на физическую сторону переходного процесса.

Анализ проведем для простейших условий трехфазного КЗ на выводах синхронного генератора, находящегося в нормальном рабочем режиме. На данном этапе принимаем отсутствие автоматического регулирования возбуждения (АРВ). В дальнейшем введем учет такого регулирования, используя материал настоящего раздела. Вначале обратимся к машине без демпферных обмоток, а далее рассмотрим влияние и приближенный учет демпферных обмоток.

Синхронная машина без демпферных обмоток

Обратимся к обсуждению постоянных времени рассматриваемой машины. Обмотка возбуждения в установившемся режиме характеризуется сопротивлениями x_f и r_f . При разомкнутой цепи статора изменение свободного тока возбуждения при резком изменении U_f будет происходить с постоянной времени*

$$T_{d0} = T_{f0} = x_f / r_f. \quad (4.30)$$

Эта постоянная времени больше любой из других постоянных времени, которыми характеризуется синхронная машина, и имеет следующие значения: $T_{f0} = 2 \dots 8$ с.

При замкнутой обмотке статора (в переходном режиме) проявляется ее влияние на параметры обмотки возбуждения. Изменение свободного тока в последней будет происходить с *переходной постоянной времени* T'_d , определяемой выражением

$$T'_f = T'_d = \frac{x'_f}{r_f}, \quad (4.31)$$

где $x'_f = x_f - x_{ad}^2 / x_d$ – переходный реактанс контура возбуждения.

* Отметим, что x_f , r_f выражены в относительных единицах. Значения постоянных времени в о. е. и именованных единицах связаны соотношением (2.10), т. е. $T_* = \omega_0 T$.

Учитывая взаимосвязь

$$x'_d/x_d = x'_f/x_f,$$

выражению (4.31) можно придать более удобную для практического применения форму:

$$T'_d = T_{d0} \frac{x'_d}{x_d}, \quad (4.32)$$

где $x'_d = x_d - x_{ad}^2/x_f$ – переходный реактанс по продольной оси машины.

Отметим, что структура выражений для переходных реактансов x'_f , x'_d совершенно идентична и отражает взаимодействие двух магнитно связанных контуров. В литературе можно встретить и другие модификации записи этих параметров.

Значение T'_d колеблется в пределах 0,6...2 с и в среднем принимается равным 1,5 с.

Если цепь статора замкнута через внешнюю реактивность $x_{вн}$, то значение постоянной времени T'_d определяется по выражению

$$T'_d = T_{d0} \frac{x'_d + x_{вн}}{x_d + x_{вн}},$$

что приводит к ее увеличению по сравнению с (4.32).

Апериодический ток в статорной цепи затухает с постоянной времени T_a , определяемой параметрами обмотки статора с учетом воздействия на нее обмотки возбуждения:

$$T_a = \frac{x_2}{r}, \quad (4.33)$$

где $x_2 = \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q}$, представляет реактивность обратной последовательности статорной цепи машины.

Среднее значение T_a составляет 0,15 с для короткозамкнутой обмотки статора, но существенно уменьшается при наличии внешнего активного сопротивления.

Проследим физику явлений и закономерности изменения вынужденной и свободных слагающих тока переходного режима в цепях статора и обмотки возбуждения синхронного генератора.

Для рассматриваемых условий на базе уравнений Парка–Горева полное выражение тока фазы А статора в мгновенных значениях с учетом затухания свободных слагающих определяется выражением [1]

$$\begin{aligned}
i_A = & \left[\frac{E_{q0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q0}}{x'_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} \right] \cos(\omega t + \gamma_0) - \\
& - \left[U_{q0} \cos \gamma_0 + U_{d0} \sin \gamma_0 \right] \frac{(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} e^{-t/T_a} - \\
& - \left[U_{q0} \cos(2\omega t + \gamma_0) - U_{d0} \sin(2\omega t + \gamma_0) \right] \frac{(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} e^{-t/T_a}, \quad (4.34)
\end{aligned}$$

где E_{q0} , E'_{q0} , U_{q0} , U_{d0} – начальные амплитудные значения синхронной, переходной ЭДС и составляющих напряжения в режиме до КЗ.

После незначительных преобразований выражение (4.34) можно записать в более компактной форме:

$$\begin{aligned}
i_A = & \left(I_{m(\infty)} + \Delta I'_{m(0)} e^{-t/T'_d} \right) \cos(\omega t + \gamma_0) - \\
& - I_{a(0)} e^{-t/T_a} - I_{m2\omega(0)} e^{-t/T_a} \cos(2\omega t + \gamma_1), \quad (4.35)
\end{aligned}$$

где $I_{m(\infty)} = I_{m(0)} = E_{q0}/x_d$ – амплитуда вынужденной *периодической* *слагаемой основной частоты*, она определяется синхронной ЭДС в установившемся режиме КЗ ($E_{q\infty}$), которая при отсутствии автоматического регулирования возбуждения равна E_{q0} ; $I'_{m(0)} = E'_{q0}/x'_d$ – начальная амплитуда *переходного тока основной частоты*; $\Delta I'_{m(0)} = \left(\frac{E'_{q0}}{x'_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) = (I'_{m(0)} - I_{m(\infty)})$ – начальная амплитуда *свободного переходного тока основной частоты*; эта составляющая периодического тока короткого замыкания затухает с переходной постоянной времени T'_d ; $I_{a(0)}$ – начальное значение *апериодического тока* в цепи статора; $I_{m2\omega(0)}$ – начальная амплитуда *свободного тока двойной частоты*.

Из структуры выражения (4.34) видно, что вторая гармоника тока короткого замыкания обусловлена несимметрией ротора ($x_q \neq x'_d$).

Из четырех составляющих тока статора три являются свободными и с течением времени затухают до нуля, так что в установившемся режиме КЗ остается только ток основной частоты с амплитудой $I_{m(\infty)}$.

Ток обмотки возбуждения в переходном режиме при отсутствии АРВ и демпферных обмоток определяется зависимостью

$$i_f = i_{f0} + \frac{(x_d - x'_d) U_{q0}}{x_{ad} x'_d} e^{-t/T'_d} - \frac{(x_d - x'_d) U_{q0}}{x_{ad} x'_d} e^{-t/T_a} \cos \omega t,$$

или более сжато

$$i_f = i_{f0} + \Delta i'_{f(0)} e^{-t/T'_d} - \Delta i'_{f(0)} e^{-t/T_a} \cos \omega t. \quad (4.36)$$

Ток указанной обмотки состоит из вынужденного тока i_{f0} и двух свободных составляющих, одна из которых является периодической.

В режиме до КЗ ток возбуждения i_{f0} , создавая магнитный поток, наводит в статорной цепи периодический ток основной частоты с амплитудой I_{m0} . В момент КЗ в силу уменьшения сопротивления внешней цепи периодический ток статора резко возрастает. Для компенсации магнитного потока, созданного приращением тока статора, в обмотке возбуждения для сохранения неизменным ее потокосцепления для $t = 0$ возникает свободный ток $\Delta i'_{f(0)} e^{-t/T'_d}$ [см. второй член выражения (4.36)]. Она затухает с переходной постоянной времени T'_d . Именно эта составляющая тока возбуждения $\Delta i'_{f(0)} e^{-t/T'_d}$ определяет свободный переходный ток основной частоты в цепи статора $\Delta I'_m(t)$ – второе слагаемое выражения (4.35). По этой причине $\Delta I'_m(t)$ затухает с той же постоянной времени T'_d .

Появление аperiodической составляющей тока статора I_a является следствием принципа неизменности потокосцепления статорной обмотки в момент нарушения режима. I_a затухает с постоянной времени T_a , определяемой параметрами статорной цепи (4.33). Аperiodические токи трех фаз статора создают неподвижный в пространстве магнитный поток. В результате пересечения этого потока ротором в обмотке возбуждения наводится синусоидальный ток синхронной частоты [последний член выражения (4.36)], который затухает с той же постоянной времени T_a . Эта составляющая тока цепи возбуждения, в свою очередь, является причиной возникновения свободного тока двойной частоты в цепи статора.

В самом деле, периодический ток ротора создает магнитный поток, который пульсирует с синхронной частотой. Чтобы проще представить его влияние на статор, разложим этот поток на два потока. Каждый из них равен половине общего потока, и вращаются они в противоположных направлениях. Один из них, вращаясь в сторону, противоположную вращению ротора, неподвижен относительно обмоток статора и частично компенсирует поток от апериодических токов статора. Другой поток, вращаясь в ту же сторону, что и ротор, перемещается относительно обмоток статора с двойной синхронной скоростью и вызывает в нем вторую гармонику тока.

Поскольку T_a существенно меньше T'_d , затухание свободных токов с постоянной времени T_a происходит значительно быстрее, чем затухание токов, характеризуемых постоянной времени T'_d .

Током двойной частоты в цепи статора, как правило, пренебрегают. Это позволяет представить действующее значение периодического тока достаточно простым выражением

$$I'_{\Pi} = \frac{E_{q0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q0}}{x'_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} = I_{\infty} + \Delta I'_{(0)} e^{-t/T'_d}.$$

Синхронная машина с демпферными обмотками

Демпферные обмотки, как известно, располагаются на роторе синхронной машины в ее продольной и поперечной осях. Физическая картина явлений в переходном режиме для данного случая во многом аналогична только что рассмотренному, когда СМ не имела демпферных обмоток. Однако есть и существенные различия, которые в первую очередь сказываются в большем числе свободных токов, их затухание происходит с иными постоянными времени, чем при отсутствии демпферных обмоток.

Обратимся к расчету постоянных времени в продольной оси машины. Обмотки статора, продольная демпферная и обмотка возбуждения, имеют магнитную связь, которая определяется реактансом взаимной индукции x_{ad} . Поэтому затухание свободных токов в этих обмотках будет взаимосвязанным. При отсутствии насыщения магнитной системы машины можно воспользоваться принципом наложения: на первом этапе учесть влияние статора на каждую из обмоток ротора, на втором – взаимное влияние роторных обмоток.

При разомкнутой демпферной обмотке (или ее отсутствии) постоянная времени обмотки возбуждения с учетом воздействия на нее обмотки статора будет определяться уже знакомым выражением

$$T'_f = \frac{x'_f}{r_f} = T_{f0} \frac{x'_d}{x_d},$$

где x'_d , x'_f – переходные реактансы цепи статора и обмотки возбуждения [см. (4.30)–(4.32)].

Аналогично можно написать выражение для постоянной времени демпферной обмотки при разомкнутом контуре возбуждения и замкнутом статоре:

$$T'_{1d} = \frac{x'_{1d}}{r_{1d}},$$

где $x'_{1d} = x_{1d} - x_{ad}^2/x_d$, r_{1d} – переходный реактанс и активное сопротивление демпферной обмотки соответственно.

Запишем общий коэффициент рассеяния для роторных обмоток при короткозамкнутом статоре:

$$\sigma = \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x'_f x'_{1d}} \right), \text{ где } x'_{ad} = x_{ad} / (x_\sigma + x_{вн}).$$

Полученные выше параметры позволяют осуществить учет взаимного влияния продольной демпферной обмотки и обмотки возбуждения при разомкнутом статоре. Для указанных обмоток можно записать характеристическое уравнение, совершенно аналогичное для двухобмоточного трансформатора:

$$p^2 \sigma T'_f T'_{1d} + p(T'_f + T'_{1d}) + 1 = 0.$$

Корни этого уравнения определяют постоянные времени:

$$T'_d = -1/p_1 \text{ и } T''_d = -1/p_2.$$

Используя свойства корней квадратного уравнения*, получаем простые и важные соотношения для постоянных времени:

$$T'_d + T''_d = T'_f + T'_{1d}; \quad (4.37)$$

$$T'_d T''_d = \sigma T'_f T'_{1d}. \quad (4.38)$$

Для определения T'_d и T''_d ограничимся приближенным решением, справедливым для относительно малых значений σ :

$$T'_d \approx T'_f + T'_{1d}; \quad (4.39)$$

$$T''_d \approx \frac{\sigma T'_f T'_{1d}}{T'_f + T'_{1d}}. \quad (4.40)$$

* Для корней x_1, x_2 квадратного уравнения $ax^2 + bx + c = 0$ справедливы следующие свойства: $x_1 x_2 = c/a$, $x_1 + x_2 = -b/a$.

Здесь T'_d – переходная постоянная времени по продольной оси генератора при наличии демпферных обмоток; T''_d – сверхпереходная постоянная времени по продольной оси.

Предостережем читателя от отождествления переходной постоянной времени (T'_d) при отсутствии и наличии демпферных обмоток, обратив внимание на (4.39). При отсутствии демпферных обмоток, как было показано ранее, $T'_d = T'_f$ [см. (4.31)].

Постоянная времени апериодического тока статора и связанного с ним тока двойной частоты определяется выражением:

$$T_a = x_2 / r,$$

в котором $x_2 = \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q}$ – реактивность обратной последовательности машины при наличии демпферных обмоток.

Наличие продольной демпферной обмотки обусловило возникновение новой постоянной времени (T''_d). Это приводит к принципиальному различию в структуре выражений тока в цепи статора и апериодических токов в продольных обмотках ротора. В частности, для тока статора, аналогично (4.35), имеем следующие составляющие:

$$i_A = \left(I_{m(\infty)} + \Delta I'_{m(0)} e^{-t/T'_d} + \Delta I''_{m(0)} e^{-t/T''_d} \right) \cos(\omega t + \gamma_0) - \\ - I_{a(0)} e^{-t/T_a} - I_{m2\omega(0)} e^{-t/T_a} \cos(2\omega t + \gamma_1). \quad (4.41)$$

По сравнению с машиной без демпферных обмоток здесь присутствует новая, сверхпереходная, слагаемая тока $\Delta I''_{m(0)} e^{-t/T''_d}$. Формулы для $I_{a(0)}$, $I_{m2\omega(0)}$ сохраняют тот же вид, что и в (4.34), в которых x'_d , x_q необходимо заменить соответственно на x''_d и x''_q . Строгие выражения для периодических слагаемых токов основной частоты получаются довольно сложными. При выполнении условия $T_{1d0} \ll T_{f0}$ ($T'_{1d} \ll T'_f$) эти выражения удастся упростить, что удобно для практических расчетов. Применительно к сказанному приведем упрощенное расчетное выражение периодической слагаемой тока статора основной частоты (в действующих значениях):

$$\begin{aligned}
I''_{\Pi} &= \frac{E_{q0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q0}}{x'_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{E''_{q0}}{x''_d} - \frac{E'_{q0}}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d} = \\
&= I_{\infty} + \Delta I'_{(0)} e^{-t/T'_d} + \Delta I''_{(0)} e^{-t/T''_d}.
\end{aligned}
\tag{4.42}$$

Рассчитывать ток по (4.42) вполне пригодно для явнополюсных машин (гидрогенераторов), у которых обычно $T_{1d0} = (0,04 \dots 0,1) T_{f0}$. Для турбогенераторов, где приближено $T_{1d0} = (0,2 \dots 0,5) T_{f0}$ оно дает бóльшую погрешность. Условие $T_{1d0} \ll T_{f0}$ наряду с (4.42) дает возможность вместо (4.39) и (4.40) записать более простые соотношения:

$$T'_d \approx T'_f \text{ и } T''_d = \sigma T'_{1d} . \tag{4.43}$$

Согласно структуре упрощенных выражений (4.42), (4.43) может показаться, что продольная демпферная обмотка приводит лишь к возникновению дополнительного свободного сверхпереходного тока, затухание которого обусловлено постоянной времени только этой обмотки. Приведенные приближенные формулы никоим образом не меняют физику явлений: наличие магнитной связи между обмотками (возбуждения и продольной демпферной) исключают какое-либо независимое изменение тока в каждой из них. Реализованное в приближенных выражениях (4.42), (4.43) условие $T_{1d0} \ll T_{f0}$ указывает лишь на преобладающее влияние обмотки возбуждения на изменение тока $\Delta I'_{(0)} e^{-t/T'_d}$, а продольной демпферной – на $\Delta I''_{(0)} e^{-t/T''_d}$.

Ток обмотки возбуждения, приведенный к статору, по отношению к условиям отсутствия демпферного контура (4.36) дополнительно содержит свободную сверхпереходную слагаемую $\Delta i''_f$:

$$i_f = i_{f0} + \Delta i'_{f(0)} e^{-t/T'_d} + \Delta i''_{f(0)} e^{-t/T''_d} + \Delta i_{f \omega(0)} e^{-t/T_a} \cos \omega t ,$$

где из условий неизменности начального тока контура соблюдается соотношение:

$$\Delta i_{f \omega(0)} = -(\Delta i'_{f(0)} + \Delta i''_{f(0)}) .$$

Условия возникновения и изменения токов в цепи продольной демпферной обмотки совершенно аналогичны условиям для обмотки возбуждения с той разницей, что в демпферной обмотке отсутствует вынужденный ток:

$$i_{1d} = \Delta i'_{1d}(0) e^{-t/T'_d} + \Delta i''_{1d}(0) e^{-t/T''_d} + \Delta i_{1d\omega}(0) e^{-t/T_a} \cos \omega t.$$

В уравнении $\Delta i'_{1d}(0)$, $\Delta i''_{1d}(0)$, $\Delta i_{1d\omega}(0)$ – начальные значения свободного переходного, сверхпереходного и периодического токов соответственно, между которыми выполняется связь:

$$\Delta i_{1d\omega}(0) = -(\Delta i'_{1d}(0) + \Delta i''_{1d}(0)).$$

В поперечной демпферной обмотке в переходном режиме возникают два свободных тока:

$$i_{1q} = \Delta i''_{1q}(0) e^{-t/T''_q} - \Delta i'_{1q}(0) e^{-t/T_a} \cos \omega t$$

– сверхпереходный, затухание которого определяется сверхпереходной постоянной времени в поперечной оси $T''_q = x''_q / r_q$, и периодический основной частоты, его затухание характеризует постоянная времени T_a .

Скажем несколько слов о влиянии демпферных обмоток на протекание переходного процесса в синхронных машинах.

Усиление неравенства $T'_f > T'_{1d}$ приводит к уменьшению T''_d и, соответственно, к увеличению T'_d [см. (4.37)], вследствие чего неравенство $T'_d > T''_d$ тоже усиливается. В зависимости от типа генераторов отношение T'_d к T''_d колеблется в пределах 10...60. Именно большое различие в постоянных времени T''_d и T'_d приводит к тому, что сверхпереходная периодическая слагаемая с малой по постоянной времени T''_d затухает с большой скоростью; достаточно быстро в этот период затухает и результирующий периодический ток. После полного затухания свободного сверхпереходного тока ($\Delta i''$) изменение общего тока происходит за счет относительно медленного затухания свободной переходной составляющей ($\Delta i'$). В этом процессе и заключается суть электромагнитного демпфирования: быстрое срезание пика тока короткого замыкания и плавное вхождение в установившийся режим.

Наличие демпферных обмоток снижает постоянную времени T_a , которая определяет скорость затухания аperiodической слагаемой и тока двойной частоты цепи статора. По величине T_a близка к T''_d ($T_a / T''_d \approx 2...7$).

Другое благоприятное воздействие демпферных обмоток в обеих осях ротора проявляется в уменьшении его электромагнитной несимметрии. Различие в значениях x''_d и x''_q обычно меньше, чем между x'_d и x_q .

Это приводит к уменьшению второй гармоники тока; у турбогенераторов эта составляющая практически отсутствует.

4.7. Гашение магнитного поля системы возбуждения генератора

При внутренних повреждениях электрической машины единственным средством прекращения тока в этой машине является ее развозбуждение, иначе говоря, гашение магнитного поля системы возбуждения. Обмотка возбуждения обладает большим запасом электромагнитной энергии, и ее быстрое поглощение представляет определенные трудности. Разрыв цепи возбуждения опасен большим перенапряжением, которое может привести к пробое изоляции, поэтому гашение магнитного поля осуществляется переключением обмотки возбуждения на активное сопротивление, называемое разрядным. Аппарат, осуществляющий эту функцию, называют автоматом гашения поля (АГП); его принципиальная схема приведена на рис. 4.13, а.

Контакт 2 в нормальном режиме замкнут, контакт 1 – разомкнут. Для гашения поля обмотки возбуждения осуществляется замыкание контакта 1, что обеспечивает введение гасительного сопротивления R , а затем размыкается контакт 2.

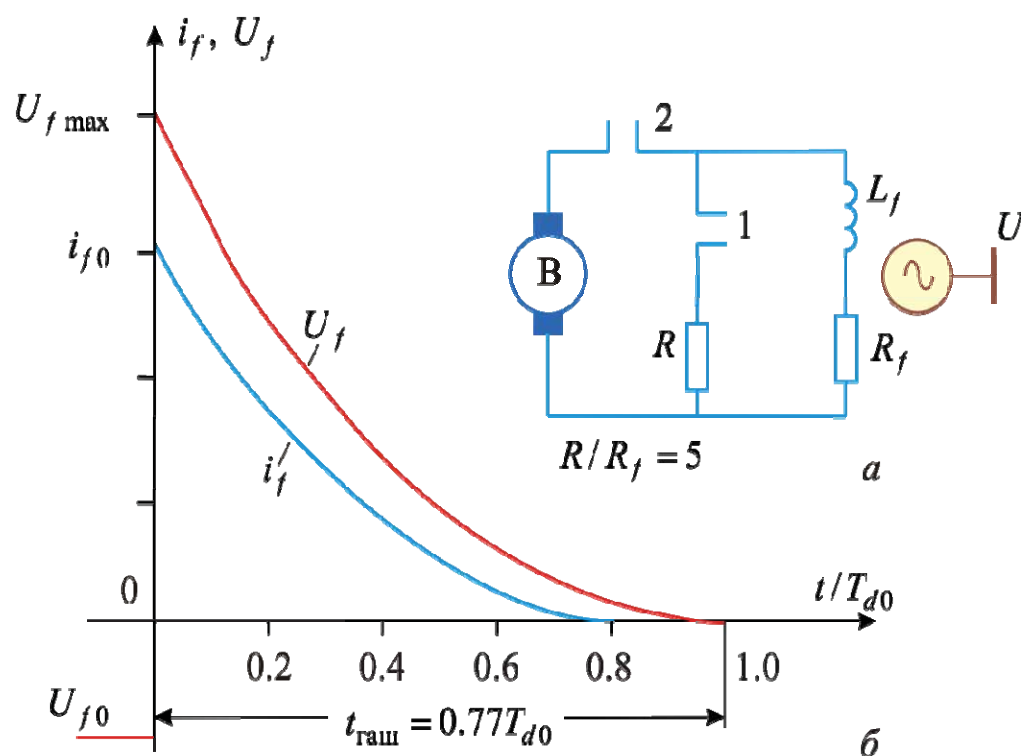


Рис. 4.13. Гашение поля синхронного генератора:
а – принципиальная схема АГП; б – затухание тока и напряжения обмотки возбуждения

Без учета демпферных обмоток и при разомкнутом статоре ток в обмотке возбуждения будет затухать в соответствии с выражением

$$i_f = i_{f0} e^{-t/T_{\text{гаш}}},$$

где

$$T_{\text{гаш}} = L_f / (r_f + R) = T_{d0} (1 + R/r_f)^{-1}$$

– постоянная времени контура гашения тока возбуждения.

Напряжение на обмотке возбуждения U_f пропорционально току i_f . Действие контактов 1 и 2 можно считать одновременным. Тогда максимальное напряжение на обмотке возбуждения достигается в момент $t = 0$:

$$U_{f \max} = U_{f0} \frac{R}{r_f}.$$

Для ускорения гашения поля необходимо увеличивать разрядное сопротивление R . Однако это приводит к повышению напряжения $U_{f \max}$, которое ограничено допустимым уровнем по условиям пробоя изоляции. Практически R выбирают в пределах от 3 до 5 r_f . Если вместо разрядного сопротивления использовать нелинейный резистор, сопротивление которого обратно пропорционально току i_f , процесс затухания последнего можно обеспечить по линейному закону, что ускорит гашение. В качестве такого сопротивления в современных АГП используют электрическую дугу, образующуюся в дугогасящей решетке автомата [1, С. 182].

4.8. Влияние автоматического регулирования возбуждения генератора при коротком замыкании

В аварийных режимах энергосистем первоочередной задачей является сохранение устойчивости параллельно работающих машин и станций. Одной из наиболее эффективных мер сохранения динамической устойчивости является максимально быстрое восстановление напряжения генераторов, которое значительно снижается при коротких замыканиях. Это достигается кратковременным увеличением тока возбуждения с максимально возможной скоростью и называется *форсировкой возбуждения*. Естественно, что увеличение тока возбуждения в переходном режиме приводит к нежелательному увеличению токов КЗ.

Выясним влияние автоматического регулирования возбуждения (АРВ) на изменение токов в переходном режиме.

Система возбуждения – это машины и аппараты для создания тока возбуждения и управления им с помощью регулирующих устройств. Система возбуждения обычно состоит из возбудителя, подвозбудителя и регулирующих устройств. Возбудитель может быть электромашинным, статическим или комбинированным.

В случае электромашинного возбудителя с независимым возбуждением (рис. 4.14) питание его обмотки возбуждения осуществляется от постороннего источника. Таким источником обычно служит подвозбудитель, представляющий собой машину постоянного тока с самовозбуждением. В возбудителе с самовозбуждением его обмотка возбуждения питается от щеток коллектора самого возбудителя (см. рис. 4.15, а).

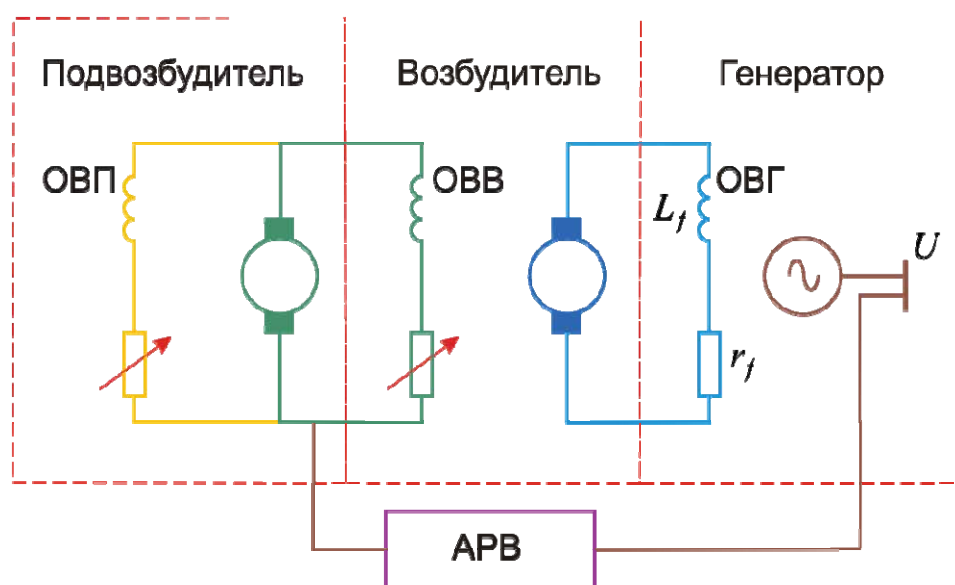


Рис. 4.14. Упрощенная схема системы возбуждения, содержащая возбудитель с независимым возбуждением (подвозбудителем):
 ОВГ – обмотка возбуждения генератора; ОВВ – обмотка возбуждения возбудителя;
 ОВП – обмотка возбуждения подвозбудителя;
 АРВ – автоматический регулятор возбуждения

По принципу регулирования тока возбуждения различают две схемы. В первой регулирование тока i_f осуществляется изменением величины регулировочного сопротивления R_p в цепи обмотки возбуждения возбудителя (см. рис. 4.15, а). Во второй на основной ток обмотки возбуждения возбудителя (i_{ff}) накладывается дополнительный ток, пропорциональный изменению напряжения или тока статора.

По закону управления током возбуждения i_f различают следующие регуляторы:

- *пропорционального действия*, регулирующие ток возбуждения пропорционально отклонению какого-либо режимного параметра, например, напряжения на выводах генератора;
- *сильного действия*, реагирующие не только на величину отклонения ($\Delta U, \Delta I$) контролируемых параметров напряжения и тока (U, I), но и на их скорость ($d\Delta U/dt, d\Delta I/dt$) и ускорение ($d^2\Delta U/dt^2, d^2\Delta I/dt^2$).

Для автоматического регулирования напряжения применяют цифровые и цифроаналоговые системы. Такие системы позволяют повысить быстродействие регулятора, а также осуществить комплексное управление агрегатом в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах. На базе цифровых систем изготавливаются регуляторы сильного действия, которые практически обеспечивают постоянное напряжение на зажимах генератора в нормальном режиме работы электрической системы.

Одним из простых и эффективных способов обеспечения надежной работы синхронной машины в аварийных условиях, как уже отмечалось, является форсировка возбуждения. Чтобы представить физическую сущность форсировки, рассмотрим схему электромашинного возбудителя с самовозбуждением (рис. 4.15).

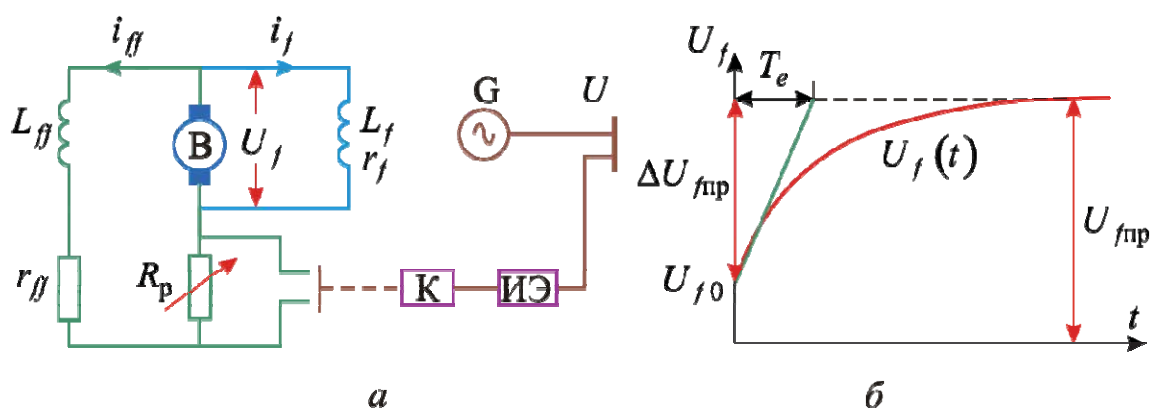


Рис. 4.15. Форсировка возбуждения синхронной машины:
а – принципиальная схема; б – зависимость $U_f(t)$

При снижении напряжения генератора за установленный уровень $(0,85 \dots 0,9)U_{ном}$ сигнал с выхода измерительного элемента (ИЭ) замыкает цепь контактора (К), который шунтирует реостат (R_p) цепи возбуждения возбудителя. В результате этого происходит подъем напряжения на возбудителе до предельной величины (потолка). Закономерность нарастания напряжения возбудителя представляет экспоненциальную зави-

симость и, считая напряжение возбудителя равным напряжению обмотки возбуждения ($U_B \approx U_f$), имеем

$$U_B \approx U_f = U_{f0} + \Delta U_{f\text{пр}} \left(1 - e^{-t/T_e}\right), \quad (4.44)$$

где $T_e = L_{ff} / r_{ff}$ – постоянная времени обмотки возбуждения возбудителя; находится в пределах 0,3...0,6 с; $\Delta U_{f\text{пр}}$ (рис. 4.15, б) представляет разность предельного ($U_{f\text{пр}}$) и начального (U_{f0}) значения напряжения цепи возбуждения.

Наращение напряжения $\Delta U_f(t)$, в соответствии с выражением (4.44), приводит к приращению тока возбуждения $\Delta i_f(t)$, который с учетом инерционности этого контура запишется так:

$$\Delta i_f(t) = \frac{\Delta U_{f\text{пр}}}{r_f} F(t) = \Delta i_{f\text{пр}} F(t), \quad (4.45)$$

где

$$F(t) = 1 - \frac{T'_d e^{-t/T'_d} - T_e e^{-t/T_e}}{T'_d - T_e} \quad (4.46)$$

– закон вынужденного приращения тока возбуждения для генератора без демпферных обмоток. $T'_d = T_{f0} \frac{x'_d + x_{\text{вн}}}{x_d + x_{\text{вн}}}$ – переходная постоянная времени по оси d с учетом внешнего реактанса $x_{\text{вн}}$ в статорной цепи; внешний реактанс существенно увеличивает переходную постоянную времени.

В современных автоматических регуляторах напряжения широко применяются тиристорные системы возбуждения, использующие управляемые тиристорные выпрямители. Такие системы обеспечивают четырехкратный (и более) потолок возбуждения, что весьма важно при форсировке. Системы возбуждения на тиристорах имеют весьма низкую постоянную времени ($T_e \approx 0,02$ с), что позволяет их считать практически безынерционными и принимать $T_e = 0$. С учетом этого при форсировке возбуждения напряжение на обмотке возбуждения скачкообразно возрастает от начального значения U_{f0} до предельного $U_{f\text{пр}}$. Функция $F(t)$ при этом существенно упрощается и представляет возрастающую экспоненту

$$F(t) = 1 - e^{-t/T_d'} \quad (4.47)$$

Графическому изображению функции тока $\Delta i_f(t)$ соответствует рис. 4.15, б (при замене символа напряжения U_f символом тока i_f).

Эффективность форсировки возбуждения определяется двумя факторами:

- быстродействием, т. е. скоростью нарастания напряжения на обмотке возбуждения (это достигается снижением постоянной времени T_e);
- кратностью форсировки возбуждения, определяемой отношением $U_{fпр}/U_{fном}$, или, что то же, $I_{fпр}/I_{fном}$.

Вынужденная составляющая приращения тока возбуждения $\Delta i_f(t)$, описываемая выражением (4.45), обуславливает соответствующую периодическую составляющую в цепи статора, которая будет изменяться по закону (4.46) или при условии $T_e = 0$ по упрощенному закону (4.47).

Как следует из сказанного выше, в начальный момент КЗ ($t = 0$), в силу инерционности магнитных потоков в системе возбуждения, влияние АРВ (или форсировки возбуждения) на периодический ток статора отсутствует. Аперриодическая слагаемая и связанная с ней вторая гармоника тока статора от АРВ вообще не зависят и, очевидно, остаются теми же, что и при его отсутствии.

Для нахождения закона изменения результирующего периодического тока короткого замыкания, с учетом АРВ, достаточно к выражению тока без АРВ (см. разд. 4.6) прибавить приращение тока, обусловленного АРВ. В практических расчетах с целью упрощения считают машину электрически симметричной, что соответствует условию $x_d'' = x_q''$ или $x_d' = x_q'$. Это исключает вторую гармонику тока в цепи статора. С учетом сказанного, в простейшем случае, для машины без демпферных обмоток действующее значение периодических токов в переходном режиме будет определяться выражением:

$$\begin{aligned} I_{Пт} &= I_\infty + (I'_{(0)} - I_\infty) e^{-t/T_d'} + (I_{пр} - I_\infty) F(t) = \\ &= I_\infty + \Delta I'_{(0)} e^{-t/T_d'} + \Delta I_{пр} F(t) \leq \frac{U_{НОМ}}{x_{кз}}. \end{aligned} \quad (4.48)$$

Имеем в виду, что $I_{\infty} = \frac{E_{q0}}{x_d + x_{кз}}$ – установившийся ток короткого замыкания при предшествующем токе возбуждения I_{f0} ;

$$I'_{(0)} = \frac{E'_{q0}}{x'_d + x_{кз}} - \text{начальное значение переходного тока КЗ};$$

$$I_{\text{пр}} = \frac{E_{q\text{пр}}}{x_d + x_{кз}} - \text{установившийся ток короткого замыкания при}$$

предельном токе возбуждения $I_{f\text{пр}}$;

$\Delta I_{\text{пр}} = (I_{\text{пр}} - I_{\infty})$ – предельное приращение тока в установившемся режиме, обусловленное действием АРВ;

$F(t)$ – закон изменения вынужденной составляющей тока КЗ, обусловленного АРВ, $F(t)$ определяется выражением (4.47) при $T_e = 0$ или (4.46) для конечного значения T_e .

Поставленное в формуле (4.48) ограничение соответствует прекращению действия АРВ при достижении напряжения генератора номинальной или иной установленной величины.

Учет влияния демпферных обмоток приводит к некоторому изменению структуры (4.48) и существенному усложнению расчетного выражения функции $F(t)$:

$$I_{\text{пт}} = I_{\infty} + \Delta I'_{(0)} e^{-t/T'_d} + \Delta I''_{(0)} e^{-t/T''_d} + \Delta I_{\text{пр}} F(t) \leq \frac{U_{\text{ном}}}{x_{кз}},$$

где $\Delta I'_{(0)}$, $\Delta I''_{(0)}$ – начальные значения *свободного переходного и сверхпереходного тока* при КЗ.

На рис. 4.16, в соответствии с выражением (4.48), графически изображены составляющие периодического тока короткого замыкания с учетом действия АРВ. В переходном режиме, с одной стороны, происходит затухание свободного переходного тока, с другой – возрастание вынужденной составляющей, обусловленной АРВ. Результирующая огибающая тока имеет сложную зависимость, которая определяется удаленностью КЗ.

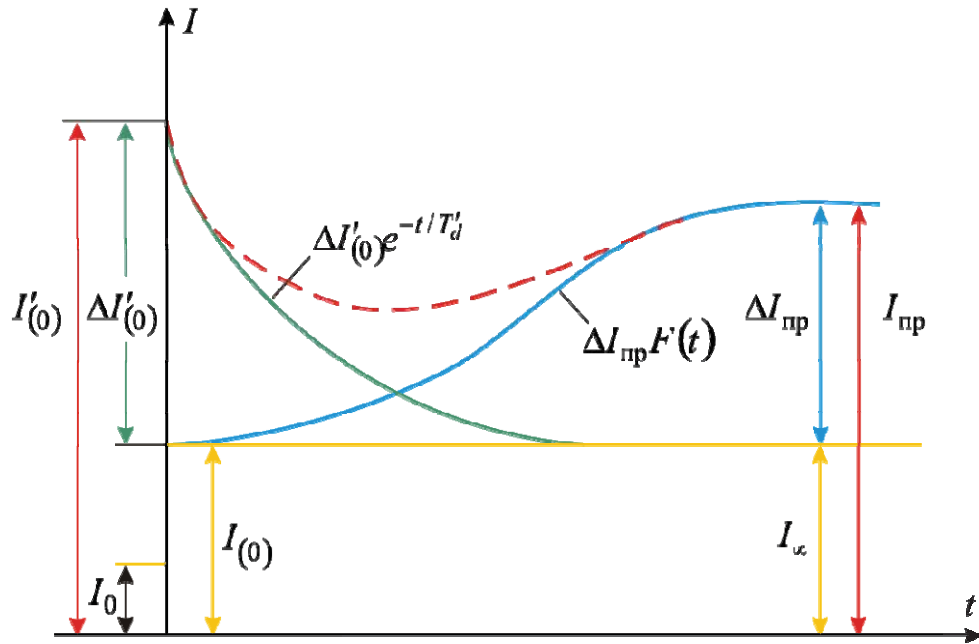


Рис. 4.16. Изменение периодических токов с учетом АРВ при коротком замыкании во внешней цепи: — составляющие периодического тока КЗ; - - - результирующая огибающая

Определим минимальную внешнюю реактивность генератора $x''_{\text{ВН}}$, которая отвечает условию: при КЗ за $x''_{\text{ВН}}$ начальный сверхпереходный $I''_{(0)}$ и установившийся ток $I_{\text{пр}}$ при предельном возбуждении одинаковы. Короткому замыканию за $x''_{\text{ВН}}$ соответствует равенство

$$\frac{E''_{q0}}{x''_d + x''_{\text{ВН}}} = \frac{E_{q\text{пр}}}{x_d + x''_{\text{ВН}}},$$

из которого находим интересующую реактивность:

$$x''_{\text{ВН}} = \frac{E''_{q0}x_d - E_{q\text{пр}}x''_d}{E_{q\text{пр}} - E''_{q0}}.$$

При малой удаленности короткого замыкания ($x_{\text{КЗ}} < x''_{\text{ВН}}$) начальный сверхпереходный ток $I''_{(0)}$ больше установившегося значения $I_{\text{пр}}$. Для значительной удаленности КЗ ($x_{\text{КЗ}} > x''_{\text{ВН}}$), наоборот, установившийся ток больше начального сверхпереходного тока $I_{\text{пр}} > I''_{(0)}$.

Обратимся к рис. 4.17, где приведены кривые изменения периодического тока статора для трех характерных удаленностей КЗ.

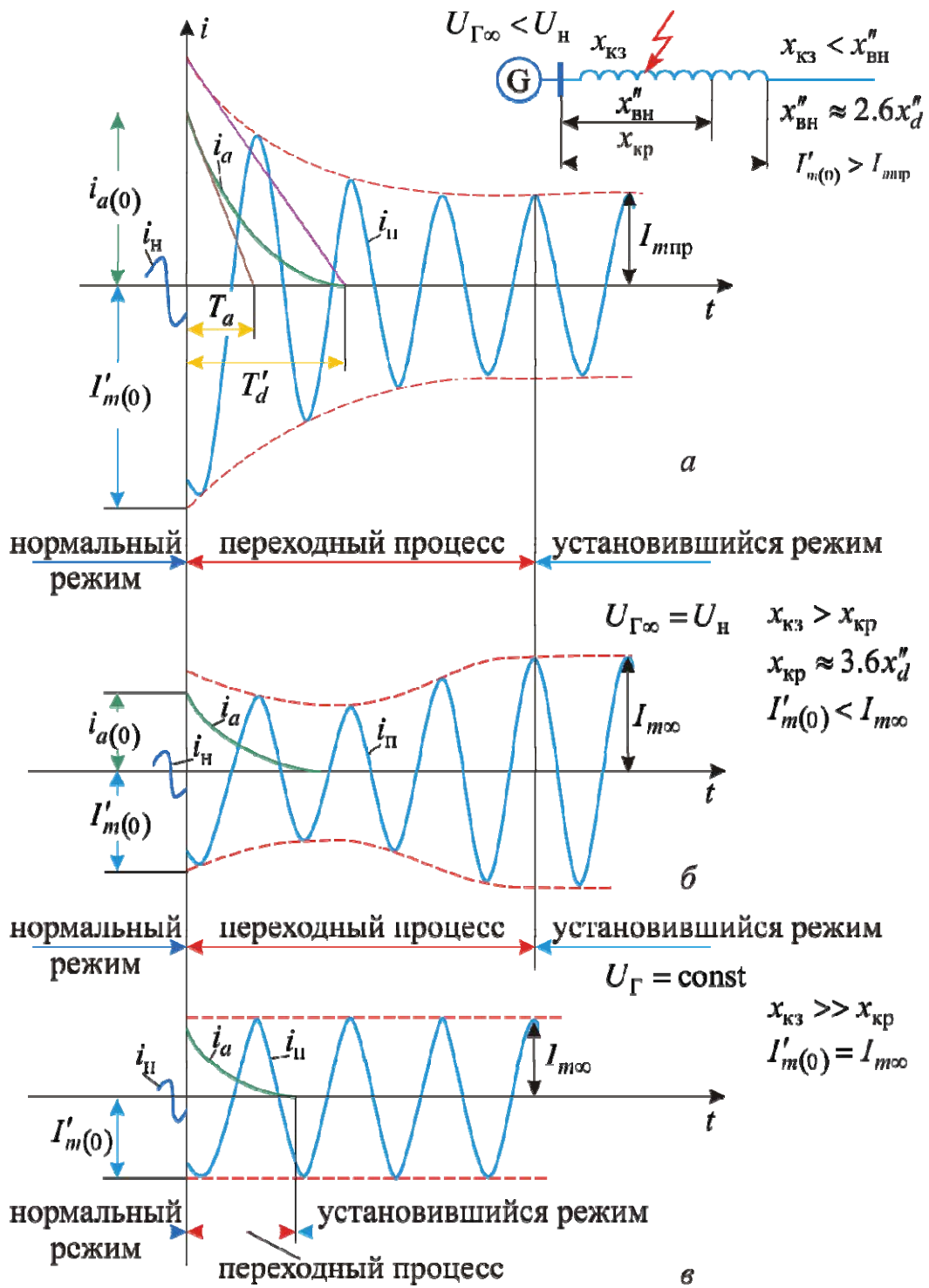


Рис. 4.17. Изменение периодического тока статора с учетом действия АРВ при различных удаленностях КЗ: а – при близком к генератору КЗ; б – при средней удаленности КЗ; в – удаленное КЗ

При малой удаленности КЗ ($x_{\text{кз}} \leq x''_{\text{вн}}$) огибающая тока генератора с АРВ имеет вид затухающей кривой (см. рис. 4.17, а). По мере увеличения дальности короткого замыкания характер огибающей тока меняется (см. рис. 4.17, б). После снижения до некоторого минимума ток статора под воздействием АРВ вновь возрастает, стремясь к установившемуся значению. При этом, как отмечалось выше, для $x_{\text{кз}} > x''_{\text{вн}}$ установившийся ток I_{∞} больше начального переходного тока $I'_{(0)}$ (или сверхпереходного тока $I''_{(0)}$). По мере роста $x_{\text{кз}}$ разность между этими токами уменьшается, и в пределе отношение $I''_{(0)}/I_{\infty}$ стремится к единице (см. рис. 4.17, в). При этих условиях амплитуда периодического тока в переходном режиме остается практически неизменной, что эквивалентно $U_{\Gamma} = \text{const}$, т. е. питанию схемы источником бесконечной мощности.

4.9. Установившийся режим КЗ

Установившейся стадией переходного процесса называется такой режим, при котором затухают все возникшие в начальный момент короткого замыкания свободные токи, и прекращается действие АРВ. Регуляторы возбуждения, увеличивая ток возбуждения, вызывают рост напряжений и токов в электрической системе. Степень этого увеличения зависит от удаленности места короткого замыкания и параметров генераторов. Если для удаленных КЗ достаточно незначительное увеличение тока возбуждения для обеспечения номинального напряжения на шинах генератора, то по мере приближения короткого замыкания к шинам генератора увеличение тока возбуждения должно быть все больше и больше. Однако рост тока возбуждения ограничен определенным пределом (потолком) $I_{f\text{пр}}$ (по условиям термической стойкости системы возбуждения) и зависит от конструктивных особенностей машины и применяемой системы возбуждения. Для турбогенераторов можно считать $I_{*f\text{пр}} = 4$, для гидрогенераторов $I_{*f\text{пр}} = 3,2$. Следовательно, не при любой удаленности короткого замыкания напряжение на шинах генератора под воздействием АРВ может быть доведено до номинального значения.

Для каждого генератора можно установить такую внешнюю реактивность $x_{\text{кр}}$, что при коротком замыкании за этой реактивностью при предельном токе возбуждения на зажимах генератора обеспечивается номинальное напряжение. Реактивность $x_{\text{кр}}$ называется *критической* и для нее справедливо следующее соотношение:

$$I_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{ном}}}{x_{\text{кр}}} = \frac{E_{q\text{пр}}}{x_d + x_{\text{кр}}}, \quad (4.49)$$

из которого находим интересующую удаленность короткого замыкания

$$x_{\text{кр}} = x_d \frac{U_{\text{ном}}}{E_{q\text{пр}} - U_{\text{ном}}}. \quad (4.50)$$

Сравнивая фактическую удаленность короткого замыкания ($x_{\text{кз}}$) с критической ($x_{\text{кр}}$), можно характеризовать режим работы генератора в установившемся режиме КЗ. При малой удаленности КЗ, когда справедливо условие $x_{\text{кз}} < x_{\text{кр}}$, генератор работает в режиме *предельного возбуждения*. В этих условиях его синхронная ЭДС достигает предельного значения ($E_q = E_{q\text{пр}}$), соответствующего предельному току возбуждения. Напряжение на выводах генератора в этих условиях не достигает номинальной величины $U_{\Gamma} < U_{\text{ном}}$. В режиме предельного возбуждения установившийся ток КЗ определяется выражением:

$$I_{\text{пр}} = E_{q\text{пр}} / (x_d + x_{\text{кз}}). \quad (4.51)$$

При удаленном коротком замыкании ($x_{\text{кз}} > x_{\text{кр}}$) генератор работает в режиме *номинального напряжения*, т. е. $U_{\Gamma} = U_{\text{ном}}$, при этом ток возбуждения меньше своего предельного значения $I_f < I_{f\text{пр}}$. В этих условиях установившемуся току короткого замыкания соответствует расчетная формула:

$$I_{\infty} = U_{\text{ном}} / x_{\text{кз}}. \quad (4.52)$$

В частном случае, когда $x_{\text{кз}} = x_{\text{кр}}$, оба ранее рассмотренных режима существуют одновременно и характеризуются тем, что $I_f = I_{f\text{пр}}$, $E_q = E_{q\text{пр}}$, $U_{\Gamma} = U_{\text{ном}}$, а установившийся ток КЗ равен предельному значению $I_{\infty} = I_{\text{пр}}$. Он может быть рассчитан либо по выражению (4.51), либо по (4.52).

Продолжительность подъема напряжения машины под действием форсировки возбуждения до номинального значения называется *критическим временем* $t_{\text{кр}}$. Чем больше скорость подъема возбуждения, тем меньше критическое время. С увеличением удаленности короткого замыкания затухание и нарастание токов происходит медленнее. Однако, т. к. снижение напряжения при этом меньше, восстановление последнего под действием АРВ происходит в более короткий отрезок времени, и, следовательно, критическое время уменьшается с ростом удаленности короткого замыкания.

4.10. Влияние двигательной нагрузки на переходный процесс

4.10.1. Общие замечания

Под двигательной нагрузкой будем понимать синхронные и асинхронные двигатели, синхронные компенсаторы и обобщенную нагрузку.

Изложенный ранее материал о параметрах синхронных генераторов в равной мере справедлив и для синхронных, и для асинхронных двигателей, которые в начальный момент нарушения режима также в общем случае характеризуются своими сверхпереходными реактивностями (x'') и сверхпереходными ЭДС (E''). Двигатели, расположенные в непосредственной близости к точке короткого замыкания, переходят в генераторный режим и являются дополнительными источниками подпитки места короткого замыкания, что требует своего учета. Тем не менее следует отметить, что это влияние, как правило, носит локальный характер и существенно зависит от следующих факторов: типа двигателя, его мощности, электрической удаленности до места короткого замыкания и стадии переходного процесса.

Наличие относительно мощной двигательной нагрузки характерно для сетей и электроустановок 6–10 кВ и относительно маломощной – для распределительных сетей 0,4 кВ.

Ток, генерируемый двигателями, учитывается при проверке аппаратов и проводников распределительных устройств (РУ) 6–10 кВ по условиям коротких замыканий, а также при выборе и расчете устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики электрооборудования. С этой целью рассчитывают периодические и аperiodические составляющие тока для момента $t = 0$ и τ – времени отключения короткого замыкания.

Ниже более детально рассматриваются индивидуальные особенности указанных видов двигательной нагрузки.

4.10.2. Синхронные двигатели и компенсаторы

Синхронные двигатели (СД) являются элементом силового электропривода, синхронные компенсаторы (СК) служат для компенсации (выработки или потребления) реактивной мощности.

Характерными режимами их работы в нормальном рабочем состоянии являются: *режим недовозбуждения* и *режим перевозбуждения*.

Недовозбужденный двигатель потребляет реактивную мощность; его синхронная E_q , равно как и сверхпереходная E'' ЭДС, меньше подведенного напряжения U_0 . Перевозбужденный синхронный двигатель

(компенсатор) является источником реактивной мощности, что соответствует неравенству $E_q > U_0$ или $E''_q > U_0$. Векторные диаграммы для этих режимов при условии $x'' = x''_d = x''_q$, что позволяет отказаться от разложения параметров по осям d и q , приведены на рис. 4.18. При их построении токи приняты со знаком «-», что соответствует двигательному режиму.

Начальные значения сверхпереходных ЭДС E''_0 в соответствии с векторными диаграммами вычисляются по формуле:

$$E''_0 = E''_{(0)} = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 \pm I_0 x'')^2}, \quad (4.53)$$

где U_0, I_0, φ_0 – параметры режима, предшествующего КЗ; знак «+» соответствует режиму перевозбуждения; знак «-» – режиму недовозбуждения.

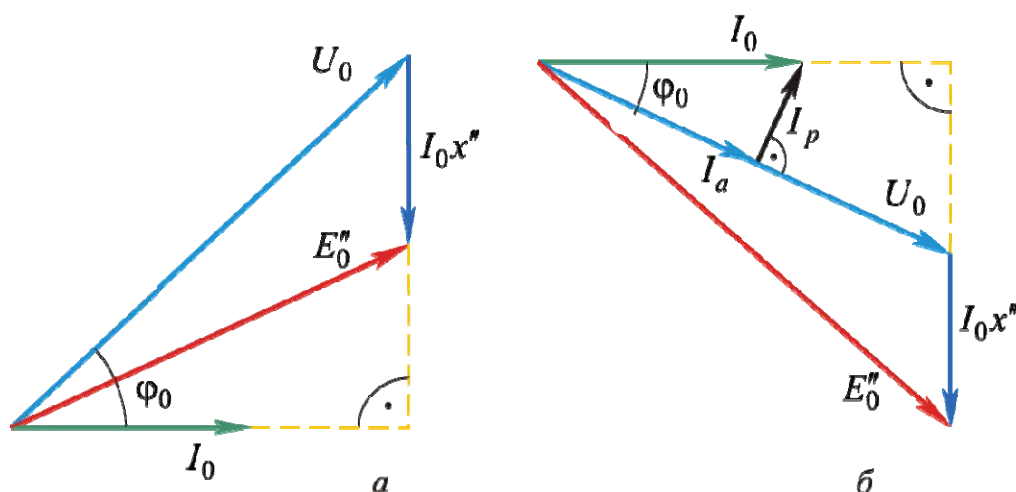


Рис. 4.18. Векторные диаграммы синхронного двигателя:
а – режим недовозбуждения (с отстающим током);
б – режим перевозбуждения (с опережающим током)

В соответствии с функциональным назначением синхронного компенсатора он потребляет незначительный активный ток; реактивный ток (I_p) является преобладающим, и угол φ_0 близок к $\pm 90^\circ$.

Рассмотрим влияние синхронной двигательной нагрузки на ток переходного режима. У перевозбужденного синхронного двигателя (компенсатора) в нормальном рабочем состоянии сверхпереходная ЭДС всегда выше подведенного напряжения ($E''_0 > U_0$). При КЗ напряжение U_0 снижается до значения $U_{(0)}$, что усиливает это неравенство, и реактивный ток, посылаемый двигателем в сеть, возрастает. Такой двигатель

является дополнительным источником подпитки места КЗ. Этого нельзя сказать в отношении синхронного двигателя, работающего в нормальном режиме с недо возбуждением. При этих условиях его сверхпереходная ЭДС меньше подведенного напряжения ($E_0'' < U_0$). Здесь в зависимости от степени снижения напряжения при КЗ его влияние неоднозначно. При удаленных КЗ, т. е. при незначительном снижении напряжения, имевшийся знак неравенства $E_0'' < U_0$ сохраняется: ($E_0'' < U_{(0)}$). Двигатель продолжает потреблять реактивный ток из сети.

При сильном снижении напряжения, что характерно для близких КЗ, знак неравенства $E_0'' < U_0$ изменяется на противоположный: $E_0'' > U_{(0)}$. Двигатель переходит в генераторный режим, посылая реактивный ток в аварийную точку. Полученные ранее закономерности изменения составляющих токов в цепях синхронного генератора в переходном режиме (разд. 4.6, 4.8) в равной мере относятся к синхронным двигателям и компенсаторам.

Единичная мощность синхронных компенсаторов, выпускаемых отечественной промышленностью, достаточно велика (табл. 4.1), и используются они весьма редко.

Таблица 4.1

Технические данные синхронных компенсаторов

Мощность при опережающем токе, МВА	Мощность при отстающем токе, МВА	Напряжение, кВ	Тип охлаждения	x_d''	T_d' , с
10; 16; 25		6,3; 10,5; 10,5	Воздушное	0,22	1,3; 1,3
50; 100; 160	40; 82,5; 130	11; 11; 15,75	Водородное	0,26; 0,2; 0,2	1,5; 1,8; 2,06

Напротив, номенклатура синхронных двигателей весьма обширна и они широко используются во многих отраслях. Осуществляется выпуск синхронных двигателей с напряжением 6; 10 кВ с единичной мощностью в диапазоне 315...31500 кВт (см. табл. 4.2).

Увеличение тока КЗ из-за перехода двигателей в генераторный режим может быть весьма существенным, когда единичная мощность двигателя или группы двигателей, расположенных вблизи точки короткого замыкания напряжением 6...10 кВ, составляет 1000 кВт и более.

При расчете токов КЗ обычно учитывают только те двигатели, которые связаны с местом КЗ непосредственно через кабельную линию

или тоководы, линейные реакторы или двухобмоточные трансформаторы. Влиянием двигателей, связанных с точкой короткого замыкания через реактанс расщепленной обмотки трансформатора или сдвоенного реактора, можно пренебречь.

В паспортных данных для синхронных двигателей вместо сверхпереходного реактанса может приводиться пусковой ток. Тогда значение сверхпереходной реактивности определится так:

$$x''_{*ном} = \frac{1}{I_{пуск*ном}}, \quad (4.54)$$

где $I_{пуск*ном} = I_{пуск} / I_{ном}$ – кратность пускового тока.

Таблица 4.2

Технические данные синхронных двигателей

Марка двигателя	Пределы мощности, кВт	$U_{ном}$, кВ	Пределы $I_{пуск*}$	$\cos \varphi$	Назначение
Явнополюсный СДН, СДНЗ	315...4000	6	4,2...7,0	0,9	Для привода насосов, мельниц, вентиляторов, дымососов и др. механизмов
Неявнополюсный СТД, ТДС	630...31500	6; 10	5,7...8,9	0,87	Для привода нефтяных, водяных насосов, газовых компрессоров
Неявнополюсный СТДП	1250...12500	6; 10	6,5...8,9	0,87	Для приводов насосов и компрессоров во взрывоопасных помещениях

Для сокращения вычислительных действий при расчетах коротких замыканий целесообразно группу двигателей, работающих с одинаковым режимом (перевозбуждения или недовозбуждения), заменять эквивалентным двигателем. Для этого определяется

$$I_{\Sigmaпуск} = \sum I_{пуск*ном(i)} I_{ном(i)}, \text{ или } I_{\Sigmaпуск*} = \frac{I_{\Sigmaпуск}}{I_{\Sigmaном}}, \quad (4.55)$$

и сверхпереходная реактивность эквивалентного двигателя, отнесенная к его номинальному току ($I_{\Sigmaном}$) и мощности ($S_{\Sigmaном} = \sum S_{ном(i)}$),

$$x''_{\text{ЭКВ*НОМ}} = \frac{1}{I_{\Sigma\text{ПУСК*}}}, \text{ где } I_{\Sigma\text{НОМ}} = \sum I_{\text{НОМ}(i)}. \quad (4.56)$$

Значение этой реактивности в относительных единицах для произвольных базисных условий следует рассчитывать по формуле

$$x''_{\text{ЭКВ*б}} = \frac{I_{\text{б}}}{I_{\Sigma\text{ПУСК}}} . \quad (4.57)$$

При расчетах режимов короткого замыкания синхронную двигательную нагрузку рекомендуется выделять в самостоятельную ветвь. Это позволяет принять для двигателей свой ударный коэффициент $K_{y(\text{сд})}$ и персонально учесть их вклад в ударный ток:

$$i_{y(\text{сд})} = \sqrt{2} I''_{\text{п(сд)}} K_{y(\text{сд})}, \quad (4.58)$$

где $I''_{\text{п(сд)}}$ – начальный сверхпереходный ток от синхронного одиночного или эквивалентного двигателя; $K_{y(\text{сд})}$ принимается по данным табл. 4.3.

Таблица 4.3

Значения T_a и K_y синхронных двигателей при КЗ на их зажимах

Серия двигателей	Параметр	Мощность двигателя P , МВт							
		1	2	3	4	5	6	7	8
СДН ВДС СТД	$T_a, \text{с}$	0,05	0,06	0,07	0,08	0,086	0,092	0,095	0,1
	K_y	1,82	1,85	1,86	1,88	1,89	1,9	1,9	1,9
СТМ	$T_a, \text{с}$	0,06	0,07	0,087	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14
	K_y	1,85	1,86	1,89	1,9	1,91	1,92	1,93	1,93

4.10.3. Асинхронные двигатели и обобщенная нагрузка

Несмотря на конструктивное отличие асинхронного и синхронного двигателей, они имеют единый принцип электромагнитного взаимодействия статорных и роторных контуров, благодаря чему в начальный момент КЗ асинхронные двигатели (АД) также характеризуются сверхпереходными ЭДС и сопротивлением.

Сверхпереходное сопротивление АД принимается равным сопротивлению КЗ заторможенного двигателя (при $s = 100\%$). Относительная величина этого сопротивления определяется пусковым током

$$x''_{*ном} = \frac{1}{I_{пуск*ном}}. \quad (4.59)$$

Благодаря симметрии ротора x'' не зависит от его положения относительно обмоток статора.

Сверхпереходная ЭДС определяется в предположении, что в начальный момент короткого замыкания асинхронный двигатель можно рассматривать как недовозбужденный синхронный двигатель, поскольку в нормальном режиме он работает с малым скольжением $s = 1...4\%$, которым можно пренебречь. Исходя из векторной диаграммы (см. рис. 4.18, а), имеем

$$E''_0 = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 - I_0 x'')^2}, \quad (4.60)$$

где U_0 , I_0 , φ_0 – параметры нормального режима.

В нормальном режиме асинхронный двигатель потребляет реактивный ток из внешней сети, его сверхпереходная ЭДС E''_0 меньше напряжения U_0 . По этой причине влияние АД в начальный момент короткого замыкания аналогично влиянию синхронного двигателя в режиме недовозбуждения: при значительной удаленности КЗ АД продолжает потреблять реактивный ток из сети и лишь при близких КЗ переходит в генераторный режим, являясь дополнительным источником подпитки места короткого замыкания.

При близких коротких замыканиях периодическая слагаемая тока, посылаемая асинхронным двигателем, с течением времени затухает до нуля. Постоянные времени затухания периодической ($T'_{ад}$) и апериодической ($T_{a.ад}$) слагаемых тока весьма близки друг к другу и относительно малы (0,04...0,15 с). Это свидетельствует о достаточно быстром одновременном затухании обеих слагаемых тока короткого замыкания, что и учитывается в ударном коэффициенте для АД.

Величина $K_{y(ад)}$ существенно зависит от мощности асинхронного двигателя (рис. 4.19). Обычно принимают значение, соответствующее средней кривой. Наличие информации о серии асинхронных двигателей позволяет принять величину ударного коэффициента по данным табл. 4.4.

При отдельном учете асинхронных двигателей ударный ток короткого замыкания следует определять по выражению

$$i_y = K_y \sqrt{2I''_{п}} + K_{y(ад)} \sqrt{2I''_{ад}}, \quad (4.61)$$

где $I''_{ад}$ – начальный сверхпереходный ток от асинхронных двигателей;
 $K_{у(ад)}$ – ударный коэффициент этих двигателей.

Асинхронные двигатели имеют весьма широкий спектр практического применения благодаря их экономическим показателям и техническим характеристикам. Промышленностью выпускаются двигатели в диапазоне 200...8000 кВт с номинальным напряжением 6; 10 кВ.

Практическому учету при КЗ в распределительных устройствах 6; 10 кВ подлежат двигатели мощностью 1000 кВт и более, которые связаны с местом короткого замыкания непосредственно через кабельную линию, тоководы или линейные реакторы.

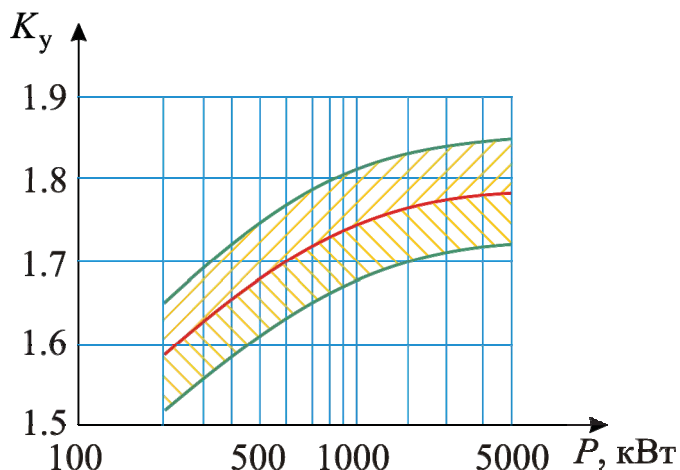


Рис. 4.19. Значения K_y для АД

Таблица 4.4

Значения постоянных времени и ударных коэффициентов асинхронных двигателей при КЗ на их зажимах

Параметр	Асинхронные двигатели серий						
	А	АО	ДА30	АТД	АТМ	ВДД, ДВДА	ДАМСО
$T'_{ад}, с$	0,04	0,04	0,09	0,06	0,075	0,06	0,044
$T_{а.ад}, с$	0,04	0,03	0,02	0,058	0,043	0,05	0,035
$K_{у(ад)}$	1,56	1,49	1,5	1,69	1,67	1,66	1,55

Обобщенная нагрузка. В начальный момент переходного процесса существенную роль играют только мощные синхронные двигатели, синхронные компенсаторы и асинхронные двигатели, которые подлежат индивидуальному учету. Все остальные двигатели небольшой мощности с другими электроприемниками целесообразно учитывать в виде *обобщенной нагрузки* крупных узлов энергосистемы. Такую нагрузку характеризуют средними параметрами, полученными для типового состава потребителей промышленного района и типовой схемы пи-

тающей его сети. Установлено, что обобщенную нагрузку в начальный момент короткого замыкания можно приближенно характеризовать сверхпереходной реактивностью и сверхпереходной ЭДС, имеющими следующие значения:

$$x''_{*об} = 0,35 ;$$

$$E''_{*об} = 0,85 .$$

Эти параметры выражены в относительных единицах при полной рабочей мощности нагрузки ($S_{наг}$, МВА) и среднем номинальном напряжении той ступени ($U_{ср.ном}$, кВ), к которой она присоединена. Выделяя обобщенную нагрузку в отдельную ветвь, для нее принимают $K_y = 1$.

Некоторая условность в содержании и параметрах обобщенной нагрузки требует критического подхода при ее учете в расчетах режимов короткого замыкания.

Контрольные вопросы

1. Какое влияние оказывают демпферные обмотки на протекание переходного процесса?
2. Какие параметры определяют синхронную машину в установившемся режиме?
3. В чем суть принципа Ленца применительно к магнитным цепям?
4. Какими параметрами характеризуются синхронные машины в начальный момент внезапного нарушения режима? Обоснуйте их физическую подоплеку и условия расчета.
5. Чем обусловлена необходимость гашения магнитного поля системы возбуждения синхронных машин?
6. Что понимается под форсировкой возбуждения и какие факторы определяют ее эффективность?
7. Назовите постоянные времени, которые определяют переходный процесс синхронного генератора при наличии и отсутствии демпферных обмоток?
8. На какие слагаемые тока переходного режима оказывает влияние АРВ?
9. В чем проявляется влияние двигательной нагрузки на токи переходного режима?

Глава 5

ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

5.1. Учет питающей системы и коэффициенты токораспределения

В зависимости от целей, для которых осуществляется расчет режима КЗ, параметры тока переходного режима рассчитываются либо для момента времени $t = 0$, либо для произвольного момента τ . В качестве момента τ , как правило, понимают время отключения КЗ. Уточнение параметров тока существенно усложняет процедуру расчета, т. к. требует индивидуального учета отдельных источников питания.

Расчет параметров системы. В качестве одного из источников подпитки места КЗ рассматриваемого энергорайона принимаем энергосистему, которую представляем в виде эквивалентного источника с реактивностью (x_c), за которой приложена неизменная ЭДС (E_c).

Информацию по указанным параметрам внешнего источника питания может предоставить энергоснабжающая организация по официальному запросу. Возможен и косвенный способ их расчета. Если известна величина начального тока I_c'' или мощности S_K при трехфазном КЗ в узле присоединения энергосистемы к рассматриваемому энергорайону, то реактивность системы можно определить по выражению:

в именованных единицах:

$$x_c = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3}I_c''} = \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_K} \text{ Ом} \quad (5.1)$$

или относительных базисных единицах:

$$x_{c*б} = \frac{I_{б}}{I_c''} = \frac{S_{б}}{S_K}. \quad (5.2)$$

При этом $U_{\text{ср}}$ – среднее номинальное напряжение ступени, соответствующее току трехфазного замыкания (I_c'') в точке присоединения электрической системы; $I_{б}$ – базисный ток для той же ступени, что и ток I_c'' .

За этой реактивностью считают подключенным источник бесконечной мощности, для которого $E_c = U_{\text{ср}}$.

Реактивность системы можно также приближенно оценить, исходя из параметров выключателей, установленных на узловой подстанции. В расчетных выражениях (5.1) и (5.2) ток I_c'' считают равным номи-

нальному току отключения этих выключателей ($I_{\text{отк.н}}$), а S_K – номинальной отключающей способности выключателя по мощности ($S_{\text{отк.н}}$).

Коэффициенты токораспределения. Для учета в сложной схеме индивидуальных особенностей источников питания удобно воспользоваться *коэффициентами токораспределения* (c).

Для схемы произвольной структуры считаем известными результирующий периодический ток $I_{\text{п}\Sigma}$ в месте КЗ и его распределение I_i по ветвям. Тогда коэффициент токораспределения c_i произвольной ветви i определится по выражению

$$c_i = \frac{I_i}{I_{\text{п}\Sigma}}. \quad (5.3)$$

При этом I_i и $I_{\text{п}\Sigma}$, приведенные к одной и той же ступени трансформации, могут быть выражены как в относительных, так и в именованных единицах.

Следовательно, коэффициент токораспределения любой ветви численно равен току этой ветви в долях (относительных единицах) от тока $I_{\text{п}\Sigma}$, который выступает в качестве базиса. Коэффициенты токораспределения ($c_{\text{г}i}$) генерирующих источников питания (синхронных генераторов, синхронных и асинхронных двигателей, «системы») характеризуют их доленое участие в питании места короткого замыкания. Сумма этих коэффициентов для всей схемы или рассматриваемой части схемы равна единице:

$$\sum c_{\text{г}i} = c_0 = 1. \quad (5.4)$$

Расчет коэффициентов распределения основан на общих законах электротехники. Схему с замкнутыми контурами рекомендуется предварительно упростить, приведя ее к сложно радиальному виду. Расчет коэффициентов c в такой схеме не представляет особых трудностей, поскольку предполагает использование формул токораспределения между параллельными ветвями (см. табл. 5.1).

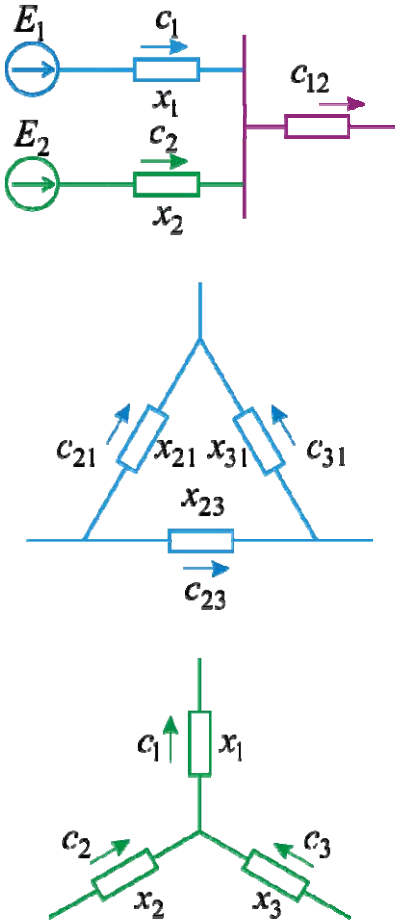
С точки зрения практического приложения коэффициентов c можно указать на две задачи.

Непосредственно из формулы (5.3) при известных значениях $I_{\text{п}\Sigma}$ и c_i можно определить ток любой ветви схемы:

$$I_i = c_i I_{\text{п}\Sigma} \cdot I_{\text{б}i}. \quad (5.5)$$

Таблица 5.1

Основные формулы расчета коэффициентов токораспределения

Схема	Расчетные формулы
	$c_1 = \frac{c_{12}x_2 + (E_1 - E_2)/I_{\Pi\Sigma}}{x_1 + x_2};$ $c_2 = \frac{c_{12}x_1 + (E_2 - E_1)/I_{\Pi\Sigma}}{x_1 + x_2};$ $c_1, c_2, c_3 - \text{известны};$ $c_{21} = \frac{c_1x_1 + c_2x_2}{x_{21}};$ $c_{31} = \frac{c_1x_1 + c_3x_3}{x_{31}};$ $c_{23} = \frac{c_2x_2 - c_3x_3}{x_{23}};$ $c_{21}, c_{31}, c_{23} - \text{известны};$ $c_1 = c_{21} + c_{31};$ $c_2 = c_{21} + c_{23};$ $c_3 = c_{31} - c_{23}$

Примечание. $I_{\Pi\Sigma}$ – результирующий периодический ток в месте КЗ в относительных или именованных единицах для той части схемы (или всей схемы), для которой $c_0 = 1$.

Вторая задача связана с преобразованием исходной многоконтурной схемы в многолучевую относительно узла КЗ (см. рис. 5.1, б).

Для любого генерирующего источника можно записать следующее равенство:

$$I_i = \frac{E_i}{x_{ik}} = c_i \frac{E_{\Sigma}}{x_{\Sigma}}, \quad (5.6)$$

где E_i , x_{iK} – ЭДС источника и его сопротивление связи с точкой короткого замыкания в лучевой схеме; E_Σ , x_Σ – эквивалентная ЭДС и реактанс исходной схемы относительно узла КЗ.

В частности, для схемы (рис. 5.1, а) имеем ее результирующие параметры:

$$E_\Sigma = E_1 // E_2 // E_3, \quad x_\Sigma = x_0 + (x_1 // x_2 // x_3).$$

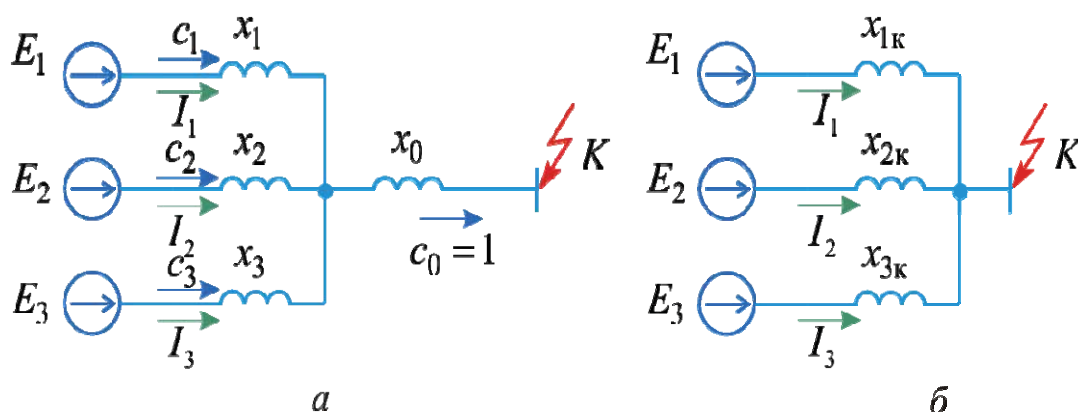


Рис. 5.1. Упрощение схемы замещения:
а – исходная схема; б – многолучевая схема

Непосредственно из выражения (5.6) можно определить взаимный реактанс между источником и точкой короткого замыкания:

$$x_{iK} = \frac{E_i x_\Sigma}{E_\Sigma c_i}. \quad (5.7)$$

Это позволяет привести исходную схему (рис. 5.1, а) к лучевой (рис. 5.1, б) и приближенно учесть индивидуальные особенности источников питания.

5.2. Расчет начальных параметров трехфазного короткого замыкания

Для решения подавляющего числа задач ограничиваются расчетом параметров тока КЗ для момента $t = 0$ с в силу их максимальных значений.

Ранее изложенный материал затрагивал основные аспекты расчета основных параметров тока КЗ, что позволяет здесь ограничиться порядком их выполнения и пояснениями общего характера.

Отметим, что основными параметрами режима КЗ являются:

$I''_{(0)}$ – начальный (сверхпереходный) периодический ток КЗ;

i_{at} – аperiodическая составляющая тока КЗ для произвольного момента времени t ;

i_y – ударный ток;

I_y – наибольшее действующее значение полного тока КЗ;

S_K – мощность КЗ.

Порядок расчета этих параметров для начального момента переходного процесса состоит в следующем.

1. Выбирают систему исчисления: относительную или именованную. Независимо от системы исчисления вполне приемлемо пользоваться приближенным приведением параметров схемы замещения (разд. 2.2.2). Для системы относительных единиц задают S_{δ} и принимают $U_{\delta i} = U_{cpi}$ согласно ряду напряжений (2.28); базисные токи ступеней трансформации определяют по выражению:

$$I_{\delta i} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta i}}.$$

2. Для заданной системы электроснабжения составляют схему замещения. В ней все источники питания конечной мощности (генераторы, синхронные компенсаторы, синхронные и асинхронные двигатели, обобщенные нагрузки), подлежащие учету, вводят в схему замещения своими сверхпереходными сопротивлениями x'' и ЭДС E'' . Систему учитывают неизменным напряжением и реактивностью (см. разд. 5.1). Учет двигательной нагрузки целесообразен при ее активной мощности 1000 кВт и более и при ее непосредственной электрической связи с узлом КЗ (см. разд. 4.10). Учет активных сопротивлений необходим при условии, когда для результирующего активного и реактивного сопротивлений схемы относительно точки КЗ выполняется неравенство $R_{\Sigma} > 0,3x_{\Sigma}$.

3. Рассчитывают параметры элементов схемы замещения (см. примеры 2.1; 5.1; 5.2). Сверхпереходные ЭДС E'' источников питания вычисляют по параметрам нормального режима, предшествующего короткому замыканию. Для нахождения $E''_{(0)}$ используем выражение:

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

В этой формуле для синхронных генераторов, компенсаторов, синхронных двигателей, работающих с перевозбуждением, принимают знак «+»; для этих же машин, работающих с недовозбуждением, и асинхронных двигателей принимают знак «-».

При отсутствии данных приближенные значения сверхпереходных ЭДС и реактивностей (E'' , x'') для генерирующих источников можно принимать согласно данным табл. 5.2.

Группу синхронных или асинхронных двигателей можно заменить одним эквивалентным (см. разд. 4.10). Это можно сделать как на стадии расчета параметров элементов схемы, так и на стадии преобразования схемы (п. 4).

Таблица 5.2

*Средние значения x'' и E_0''
(в относительных единицах при номинальных условиях)*

Элементы ЭС	x''	E_0''
1. Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	0,125	1,08
2. То же мощностью 100–500 МВт	0,2	1,13
3. Гидрогенераторы с демпферными обмотками	0,2	1,13
4. То же без демпферных обмоток	0,27	1,18
5. Синхронный двигатель	0,2	1,1
6. Синхронный компенсатор	0,2	1,2
7. Асинхронный двигатель	0,2	0,9
8. Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

4. Упрощают схему. При наличии замкнутых контуров целесообразно на первом этапе упрощения привести схему к сложно радиальному виду. Последующее упрощение состоит в нахождении эквивалентной ЭДС (E_{Σ}'') и реактивного сопротивления схемы (x_{Σ}) относительно узла КЗ. При преобразовании схемы рекомендуется ветви с двигательной нагрузкой не объединять с генераторными или системными ветвями. В общем случае конечная схема будет иметь лучевой вид (см. рис. 5.1, б). При такой схеме удастся учесть индивидуальные особенности двигателей, генераторов и системы в расчете ударного тока короткого замыкания или периодического тока для произвольного времени t (см. разд. 5.3).

5. Подсчитывают основные параметры режима короткого замыкания.

- Начальное (сверхпереходное) значение периодического тока короткого замыкания определяется по одному из следующих выражений:

при использовании системы именованных единиц:

$$I_{(0)\Sigma}'' = \frac{E_{\Sigma}''}{\sqrt{3}x_{\Sigma}}, \text{ или } I_{(0)\Sigma}'' = \sum \frac{E_i''}{\sqrt{3}x_i}; \quad (5.8)$$

при использовании системы относительных единиц:

$$I''_{(0)\Sigma} = \frac{E''_{\Sigma*6}}{x_{\Sigma*6}} I_6, \text{ или } I''_{(0)\Sigma} = I_6 \sum \frac{E''_{i*6}}{x_{i*6}}. \quad (5.9)$$

При этом E''_{Σ} , x_{Σ} – результирующие параметры схемы относительно узла КЗ, приведенные к напряжению ступени КЗ; E''_i , x_i – результирующие параметры отдельных ветвей в многолучевой схеме, приведенные к $U_{\text{кз}}$; I_6 – базисный ток, соответствующий напряжению $U_{\text{кз}}$.

- Аперриодический ток короткого замыкания для времени t рассчитывается так:

$$i_{at} = \sqrt{2} I''_{(0)\Sigma} e^{-t/T_a}, \quad (5.10)$$

где T_a – эквивалентная постоянная времени для всей схемы.

При наличии нескольких генерирующих ветвей относительно точки КЗ и более детальном учете их постоянных времени имеем

$$i_{at} = \sqrt{2} \sum I''_{(0)i} e^{-t/T_{ai}}, \quad (5.11)$$

где T_{ai} – постоянная времени аперриодического тока i -й ветви схемы.

Значения T_a и T_{ai} принимаются по тем же таблицам и рисункам, что и для K_y .

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

$$i_y = \sqrt{2} I''_{(0)\Sigma} K_y \quad (5.12)$$

или с учетом индивидуальных ударных коэффициентов для выделенных источников питания:

$$i_y = \sqrt{2} \sum I''_{(0)i} K_{y(i)}. \quad (5.13)$$

Значения K_y для синхронных двигателей можно принимать по табл. 4.3, для асинхронных – по табл. 4.4 или по рис. 4.20; для эквивалентной ветви *генераторы–система* K_y – по данным табл. 5.3.

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ допустимо определять с учетом единого для схемы ударного коэффициента, соответствующего лучу *генераторы–система* (см. табл. 5.3),

$$I_y = I''_{(0)\Sigma} \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}. \quad (5.14)$$

- Мощность короткого замыкания определяется по формуле:

$$S_K = I''_{(0)\Sigma} \sqrt{3} U_{cp}, \text{ или } S_K = I''_{(0)\Sigma} * S_{\sigma}. \quad (5.15)$$

Таблица 5.3

Значения K_y и T_a для наиболее часто встречающихся элементов ЭЭС

Место короткого замыкания и характеристика сети	$T_a, \text{ с}$	K_y
1. Сборные шины 6–10 кВ станций с генераторами мощностью 30–60 МВт	0,127–0,254	1,92–1,96
2. За линейным реактором до 1000 А, присоединенным к сборным шинам, по п. 1	0,0634–0,191	1,85–1,95
3. Сборные шины повышенного напряжения станций с трансформаторами мощностью 100 МВА и выше	0,0955–0,191	1,89–1,95
4. То же с трансформаторами 30–100 МВА	0,0634–0,159	1,85–1,94
5. Сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 100 МВА и выше; сопротивление трансформаторов составляет 90 % и выше результирующего сопротивления до места КЗ	0,0634–0,127	1,85–1,92
6. То же с трансформаторами 30–100 МВА	0,048–0,0955	1,81–1,89
7. Распределительные сети 6–10 кВ	0,01	1,869
8. Ветви, защищаемые реактором с номинальным током 630 А и ниже	0,1	1,904
9. Турбогенераторы мощностью: 100–1000 МВт; 12–60 МВт	0,4–0,54; 0,16–0,25	1,975–1,98; 1,94–1,955
10. Блоки, состоящие из турбогенератора и повышающего трансформатора, при мощности генератора: 100–200 МВт; 300 МВт; 500 МВт; 800 МВт	0,26; 0,32; 0,35; 0,30	1,965; 1,977; 1,983; 1,967
11. Система, связанная с шинами (где рассматривается КЗ) воздушными линиями, напряжением: 35 кВ; 110–150 кВ; 220–330 кВ; 500–750 кВ	0,02; 0,02–0,03; 0,03–0,04; 0,06–0,08	1,608; 1,608–1,717; 1,717–1,78; 1,85–1,895

5.3. Расчет периодической слагаемой тока короткого замыкания в произвольный момент времени

На начальной стадии переходного процесса происходит затухание периодических слагаемых тока КЗ, созданных генераторами, синхронными компенсаторами и двигателями. Скорость этого затухания существенно зависит от типа источника и его электрической удаленности до места КЗ. Чем ближе источник, тем больше скорость затухания. В практических расчетах учет фактора времени и удаленности источника на периодическую слагаемую осуществляется по *расчетным кривым*. Они построены для различных типов генераторов, синхронных и асинхронных двигателей.

Расчетные кривые для генераторов представляют графическое изображение семейства зависимостей:

$$\gamma_{\Gamma t}(t) = \frac{I_{\Gamma t}}{I''_{\Gamma(0)}}, \quad (5.16)$$

где $I''_{\Gamma(0)}$ и $I_{\Gamma t}$ – периодические слагаемые тока КЗ соответственно для момента $t = 0$ и произвольного времени t .

Расчетные кривые построены для различных удаленностей короткого замыкания (см. на рис. 5.2 кривые, обозначенные цифрами от 1 до 8). Положение расчетных кривых определяется параметром

$$I_{\Gamma(0)*\text{НОМ}} = \frac{I''_{\Gamma(0)}}{I_{\Gamma(\text{НОМ})}} = \text{var}, \quad (5.17)$$

где $I_{\Gamma(\text{НОМ})}$ – номинальный ток генератора.

При близких КЗ ток генератора существенно возрастает по отношению к номинальному, так что параметр $I_{\Gamma(0)*\text{НОМ}}$ велик. Его максимальному значению соответствует короткое замыкание на шинах генератора. Для средних значений сверхпереходной ЭДС ($E'' = 1,08$) и реактивности генератора ($x'' = 0,135$) имеем $I_{\Gamma(0)*\text{НОМ}} = E'' / x'' = 1,08 / 0,135 = 8$, что соответствует расчетной кривой под номером 8 на рис. 5.2.

По мере удаления точки КЗ кратность $I_{\Gamma(0)*\text{НОМ}}$ снижается и в пределе стремится к 1. Это настолько удаленное КЗ, что напряжение на шинах генератора остается неизменным; ток короткого замыкания равен его номинальному току.

Типовые кривые определяют простой алгоритм их применения.

По *условной электрической удаленности точки КЗ*, характеризуемой параметром $I_{\Gamma(0)*\text{НОМ}}$, выбирают соответствующую расчетную кривую.

Для заданного времени t на оси абсцисс поднимаются вверх по вертикали до пересечения с выбранной расчетной кривой. С этой точки пересечения обращаются к оси ординат, на которой получают значение коэффициента затухания тока γ_t , что позволяет рассчитать периодический ток для принятого времени t по выражению

$$I_{\Gamma t} = \gamma_{\Gamma t} I''_{\Gamma(0)}. \quad (5.18)$$

Приведенные на рис. 5.2 расчетные кривые являются унифицированными и применимы для турбогенераторов мощностью 12...800 МВт, гидрогенераторов мощностью до 500 МВт и синхронных компенсаторов мощностью 37,5...100 МВА. Эти кривые построены для машин с вентильной системой возбуждения. Нарастание напряжения на обмотке возбуждения при форсировке происходит скачкообразно, т. е. $T_e = 0$.

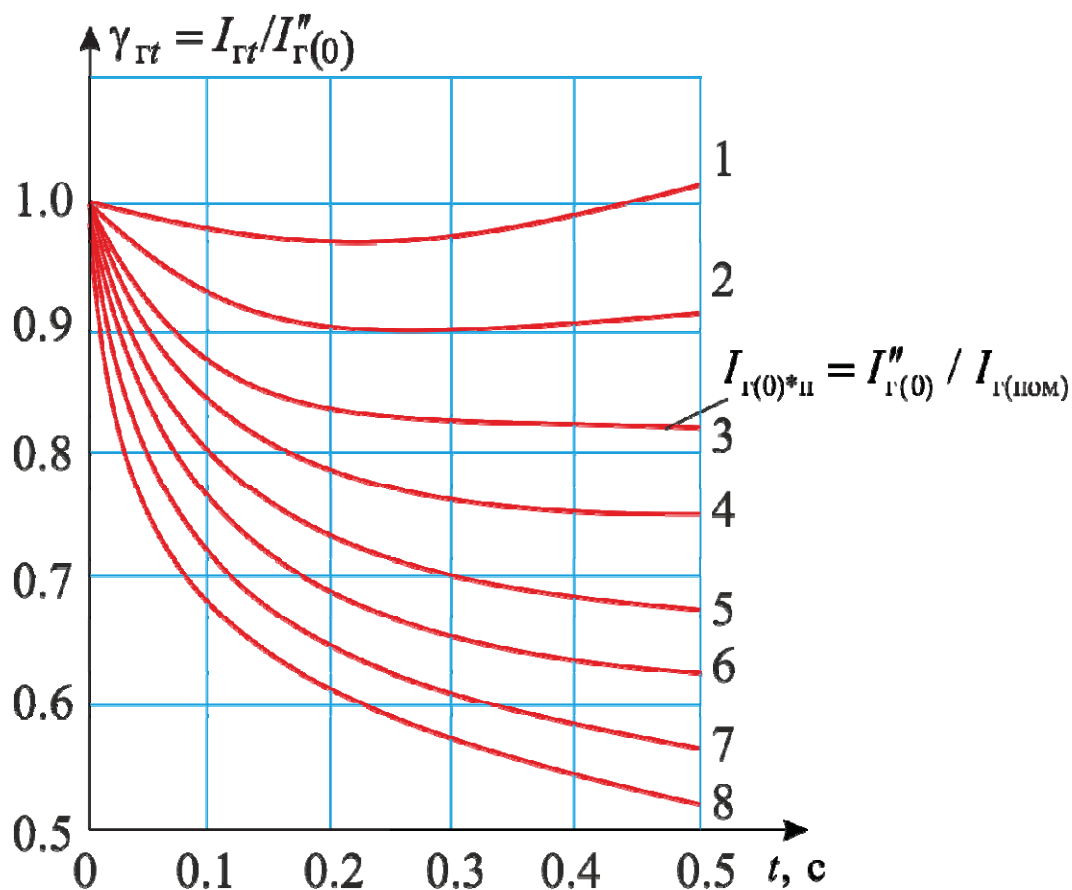


Рис. 5.2. Расчетные кривые изменения во времени периодической составляющей тока КЗ синхронных генераторов при различных удаленностях точки короткого замыкания

На рис. 5.3–5.5 приведены расчетные кривые для синхронных и асинхронных двигателей.

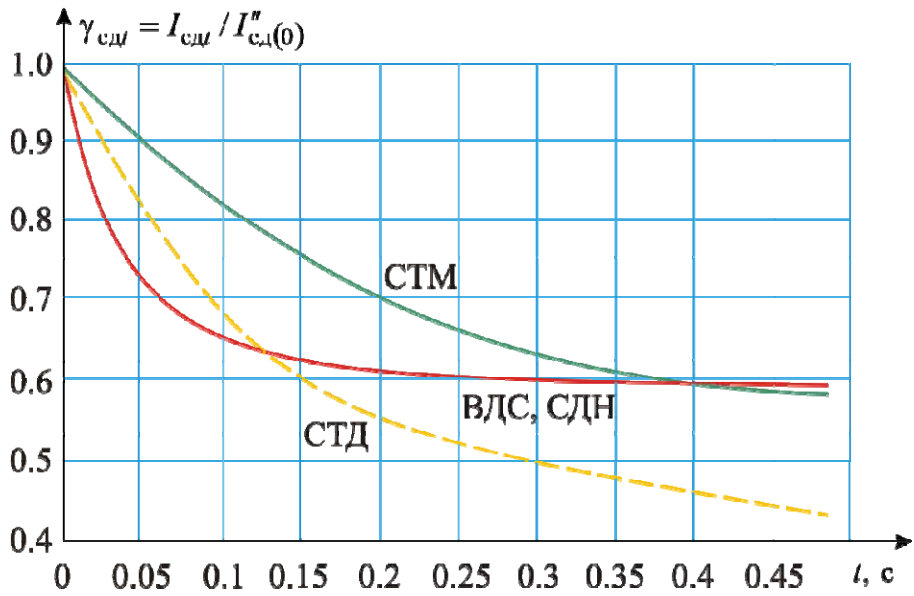


Рис. 5.3. Расчетные кривые изменения во времени периодической составляющей тока КЗ синхронных двигателей, связанных непосредственно с точкой КЗ

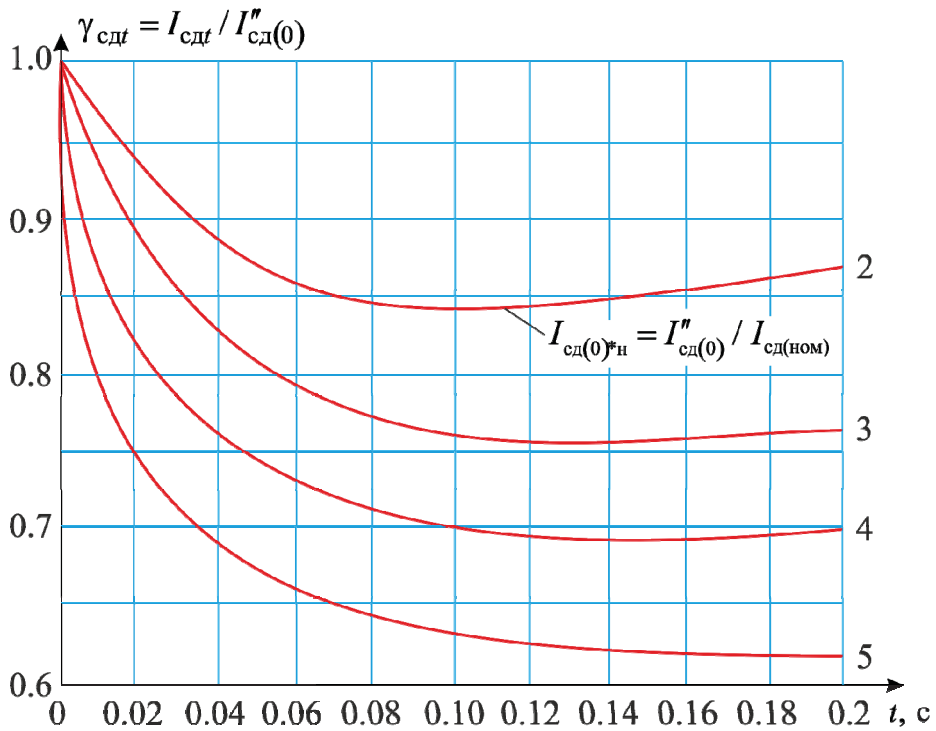


Рис. 5.4. Расчетные кривые изменения во времени периодической составляющей тока синхронных двигателей при их различных удаленностях от точки КЗ

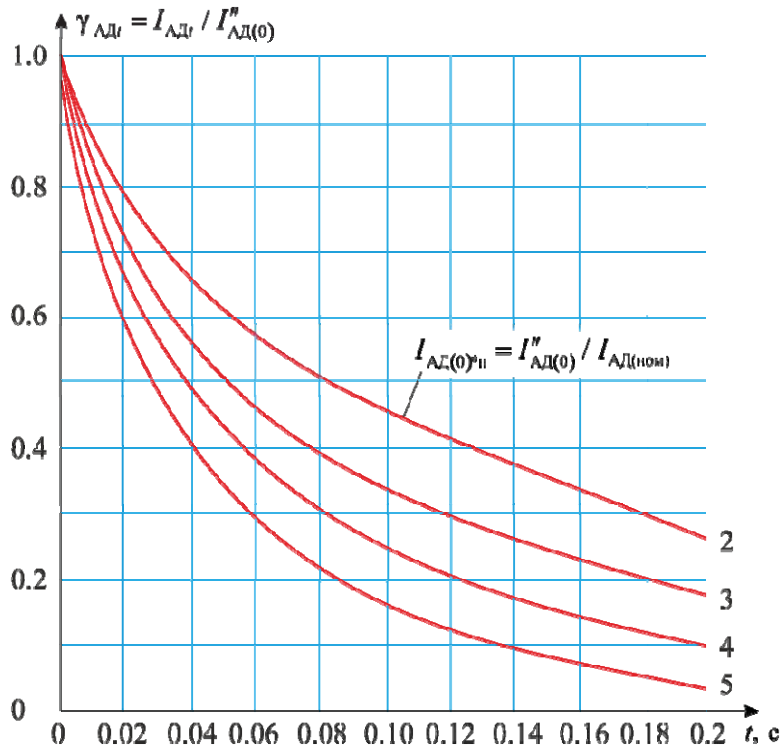


Рис. 5.5. Расчетные кривые изменения во времени периодической составляющей тока КЗ асинхронных двигателей при различных удаленностях от точки КЗ

При расчете периодической слагаемой тока КЗ в произвольный момент времени t все этапы вычисления, изложенные в разд. 5.2 для $t = 0$, остаются в силе. Применение типовых кривых предполагает индивидуальный учет источников питания (генераторов, двигателей, синхронных компенсаторов).

Этому требованию отвечает лучевая схема относительно узла КЗ. Для источников питания, связанных с узлом короткого замыкания через общие ветви, можно воспользоваться коэффициентами токораспределения c .

Для генераторов, синхронных и асинхронных двигателей определяется параметр их электрической удаленности ($I_{\Pi(0)}i^*_{\text{ном}}$) до узла короткого замыкания.

При связи машины с местом КЗ через индивидуальную реактивность этот параметр рассчитывается по формуле:

$$I_{\Pi(0)}i^*_{\text{ном}} = \frac{I''_{\Pi(0)}i}{I_{i\text{ном}}} = I_{\Pi(0)}i^*_{\text{б}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{i\text{ном}}}. \quad (5.19)$$

А при связи машин с местом КЗ через общие для них реактивности – по выражению:

$$I_{\Pi(0)i^*_{\text{НОМ}}} = I''_{\Pi\Sigma(0)*\delta} c_i \frac{S_{\delta}}{S_{i_{\text{НОМ}}}}, \quad (5.20)$$

где $I''_{\Pi\Sigma(0)*\delta}$ – суммарное значение периодического тока короткого замыкания от группы источников при $t=0$ в относительных базисных единицах; коэффициент $c=1$ соответствует ветви с током $I''_{\Pi\Sigma(0)*\delta}$; c_i – коэффициент токораспределения i -го источника.

По соответствующим расчетным кривым для найденного $I_{\Pi(0)i^*_{\text{НОМ}}}$ и заданного времени t определяется коэффициент затухания γ_{it} периодического тока. При $I_{\Pi(0)i^*_{\text{НОМ}}} < 2$ источник считается электрически удаленным, а периодическая слагаемая неизменной во времени, т. е. $\gamma_{it} = 1$. Для «системы», характеризуемой $U_c = \text{const}$, периодическая слагаемая во времени неизменна ($\gamma_c = 1$).

Искомое значение периодической составляющей тока короткого замыкания в заданный момент времени определяется по выражению:

$$I_{\Pi\Sigma t} = \sum I''_{\Pi(0)i} \gamma_i + I''_{\Pi\Sigma(0)} \sum c_j \gamma_j. \quad (5.21)$$

Первая Σ относится к источникам, связанным с местом КЗ через индивидуальные ветви; коэффициенты токораспределения для этой группы источников не рассчитываются. Второе слагаемое учитывает группу источников, связанных с точкой КЗ через общие для них ветви. Параметр $I''_{\Pi\Sigma(0)}$ является результирующим током этой группы источников; при этом $\sum c_i$ должна быть равна единице. В частном случае одна из сумм в выражении (5.21) может отсутствовать.

Пример 5.1. Для принципиальной схемы подстанции, приведенной на рис. 5.6, а, при трехфазном КЗ в точке K определить:

- суммарную периодическую составляющую тока для $t=0$;
- ударный ток;
- наибольшее действующее значение тока короткого замыкания;
- периодический ток для времени $\tau = 0,2$ с.

Параметры элементов схемы

Система: $U_c = 158$ кВ, $S_{\text{КЗ}} = 4000$ МВА.

Трансформатор с расщепленной обмоткой на стороне 6,3 кВ; $S_{\text{НОМ}} = 32$ МВА, $U_{\text{В}}/U_{\text{Н}} = 158/6,3$ кВ, $U_{\text{К(В-Н)}} = 12\%$; $K_p = 3,5$ – коэффициент расщепления.

Кабельные линии: $n = 3$, $L = 750$ м; $x_0 = 0,066$, $r_0 = 0,21$ Ом/км.

Двигательная нагрузка с рабочим напряжением $U_p = 6,15$ кВ на обеих секциях шин одинаковая и имеет параметры:

	АД-1 серии АТД	СД-2 серии СДН	СД-3 серии СДН
$P_{\text{НОМ}}$, кВт	800	1600	3200
$I_{\text{НОМ}}$, А	90	180	360
$I_{*\text{пуск}}$, о. е.	5.3	5	6.6
$\cos \varphi_0$	0.89	0.95	0.95

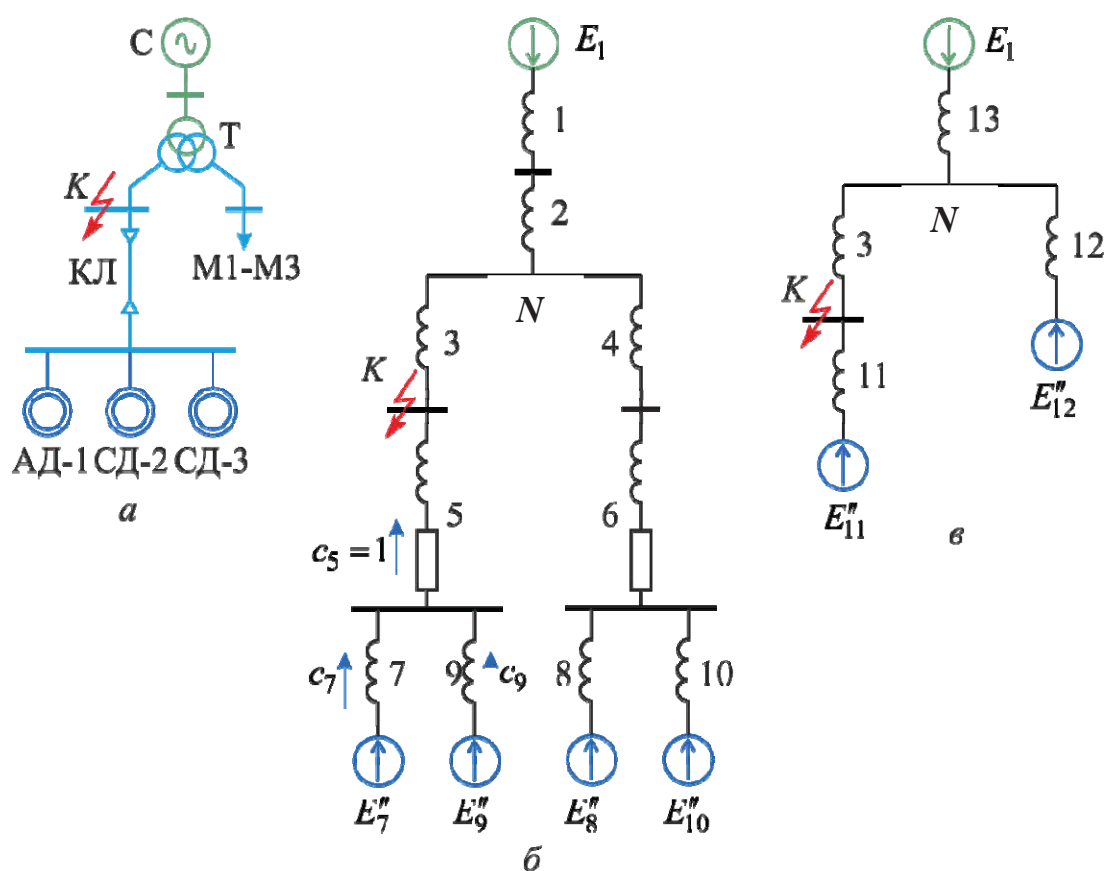


Рис. 5.6. К примеру 5.1: а – принципиальная схема; б, в – схемы замещения

Решение

В рассматриваемых условиях влиянием двигательной нагрузки, расположенной на соседней по отношению к точке КЗ секции шин, можно пренебречь. С целью подтверждения этого мы на первом этапе расчетов оценим вклад этих двигателей (М1–М3) в общий ток КЗ.

1. Расчет параметров схемы замещения (рис. 5.6, б, в)

Принимаем $S_{\bar{\sigma}} = 32$ МВА, $U_{\bar{\sigma}} = 6,3$ кВ, $U_{\bar{\sigma}1} = 158$ кВ; находим базисный ток:

$$I_{\bar{\sigma}} = \frac{32}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 2,94 \text{ кА.}$$

Рассчитываем сопротивления и ЭДС элементов схемы замещения в относительных единицах при принятых базисных условиях:

- системы:

$$x_{1*} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{кз}}} = \frac{32}{4000} = 0,008, \quad E_{1*} = \frac{U_{\text{с}}}{U_{\bar{\sigma}1}} = \frac{158}{158} = 1;$$

- трансформатора:

$$x_{2*} = 0,125 \frac{U_{K(B-H)}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{НОМ}}} = 0,125 \cdot \frac{12}{100} \cdot \frac{32}{32} = 0,015;$$

$$x_{3*} = x_{4*} = 1,75 \cdot \frac{12}{100} \cdot \frac{32}{32} = 0,21;$$

- кабельных линий:

$$x_{5*} = x_{6*} = \frac{x_0 L}{n} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2} = \frac{0,066 \cdot 0,75}{3} \cdot \frac{32}{6,3^2} = 0,0133;$$

$$R_{5*} = R_{6*} = 0,0423;$$

- асинхронных двигателей АД-1:

$$x_{7*} = x_{8*} = \frac{1}{I_{*\text{пуск}}} \cdot \frac{I_{\bar{\sigma}}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{1}{5,3} \cdot \frac{2,94}{0,09} = 6,163;$$

$$I_{\text{НОМ}*} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{I_{\bar{\sigma}}} = \frac{0,09}{2,34} = 0,031; \quad U_{\text{р}*} = \frac{6,15}{6,3} = 0,976.$$

Сверхпереходные ЭДС рассчитываем по выражению (4.60):

$$\begin{aligned} E_{7*}'' = E_{8*}'' &= \sqrt{(U_{\text{р}*} \cos \varphi_0)^2 + (U_{\text{р}*} \sin \varphi_0 - I_{\text{НОМ}*} x_{7*})^2} = \\ &= \sqrt{(0,976 \cdot 0,89)^2 + (0,976 \cdot 0,456 - 0,031 \cdot 6,163)^2} = 0,905. \end{aligned}$$

Синхронные двигатели СД-2, СД-3 заменяем одним эквивалентным. По выражению (4.55) находим суммарный пусковой ток в именованных единицах:

$$I_{\Sigma\text{пуск}} = 5 \cdot 180 + 6,6 \cdot 360 = 3276 \text{ А}, \quad I_{\Sigma\text{НОМ}*} = \frac{0,18 + 0,36}{2,94} = 0,1837$$

и реактансы: $x_{9*} = x_{10*} = \frac{I_{\sigma}}{I_{\Sigma\text{пуск}}} = \frac{2,94}{3,276} = 0,897$.

Сверхпереходные ЭДС синхронных двигателей для режима перевозбуждения находим по выражению (4.53):

$$E_{9*}'' = E_{10*}'' = \sqrt{(0,976 \cdot 0,95)^2 + (0,976 \cdot 0,31 + 0,1837 \cdot 0,897)^2} = 1,038.$$

2. Расчет параметров тока КЗ для $t = 0$ с

Эквивалентные параметры схемы первой секции шин относительно точки КЗ:

$$x_{11*} = x_{7*} // x_{9*} + x_{5*} = 0,796, \quad E_{11}'' = E_{7*}'' // E_{9*}'' = 1,021.$$

Поскольку $R_{5*} = 0,0423 < \frac{1}{3} x_{11}$, то им можно пренебречь.

Эквивалентные параметры относительно узла N второй секции шин:

$$E_{12*}'' = E_{8*}'' // E_{10*}'' = 1,021, \quad x_{12*} = x_{8*} // x_{10*} + x_{6*} + x_{4*} = 1,006$$

и питающей системы:

$$x_{13*} = x_{1*} + x_{2*} = 0,023.$$

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ, создаваемого источниками E_1 и E_{12} , составляет

$$I_{(0)c+дв}'' = \frac{E_{13*}''}{x_{14*}} I_{\sigma} = \frac{2,94}{0,2325} = 12,645 \text{ кА},$$

где $E_{13*}'' = E_{12*}'' // E_{1*}'' = 1,0$; $x_{14*} = x_{12*} // x_{13*} + x_{3*} = 0,2325$.

Пренебрегая влиянием двигательной нагрузки М1–М3, находим значение периодической составляющей тока, генерируемого только системой:

$$I_{(0)c}'' = \frac{E_{1*}''}{x_{13*} + x_{3*}} I_{\sigma} = \frac{2,94}{0,023 + 0,21} = 12,62 \text{ кА},$$

что дает погрешность 0,2 %.

Периодический ток КЗ, обусловленный двигателями первой секции шин, в относительных и именованных единицах:

$$I_{(0)дв*}'' = \frac{E_{11}''}{x_{11*}} = \frac{1,021}{0,796} = 1,282, \quad I_{(0)дв}'' = 1,282 \cdot 2,94 = 3,77 \text{ кА}.$$

Для определения персонального вклада асинхронного и эквивалентного синхронного двигателей в их результирующий ток $I_{(0)дв}''$ рассчитаем коэффициенты токораспределения:

$$c_9 = \frac{c_5 x_{7*} + (E_{9*}'' - E_{7*}'') / I_{(0)ДВ*}''}{x_{7*} + x_{9*}} = \frac{1 \cdot 6,163 + (1,038 - 0,905) / 1,282}{6,163 + 0,897} = 0,887;$$

$$c_7 = c_5 - c_9 = 1 - 0,887 = 0,113.$$

Следовательно, начальный периодический ток в месте КЗ персонально от каждого из двигателей составляет:

$$I_{(0)ад}'' = 3,77 \cdot 0,113 = 0,426 \text{ кА}, \quad I_{(0)дс}'' = 3,77 \cdot 0,887 = 3,344 \text{ кА},$$

и результирующий ток, создаваемый всеми источниками,

$$I_{(0)\Sigma}'' = I_{(0)с}'' + I_{(0)ад}'' + I_{(0)сд}'' = 12,62 + 0,426 + 3,344 = 16,39 \text{ кА}.$$

Ударный ток определим с учетом персональных ударных коэффициентов для каждого из выделенных источников питания:

для системы по табл. 5.3, п. 6 имеем $K_{y(c)} = 1,89$;

для АД серии АДД по табл. 4.4 имеем $K_{y(ад)} = 1,69$;

для СД серии СДН по табл. 4.3 имеем $K_{y(сд)} = 1,89$ и, следовательно,

$$\begin{aligned} i_y &= \sqrt{2} \left(I_{(0)с}'' K_{y(c)} + I_{(0)ад}'' K_{y(ад)} + I_{(0)сд}'' K_{y(сд)} \right) = \\ &= \sqrt{2} (12,62 \cdot 1,89 + 0,426 \cdot 1,69 + 3,344 \cdot 1,89) = 43,68 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Учитывая, что АД дает незначительный вклад в i_y , последний можно рассчитать по единому $K_{y(c)}$, принятому для системы:

$$i_y = \sqrt{2} I_{(0)\Sigma}'' K_{y(c)} = \sqrt{2} \cdot 16,39 \cdot 1,89 = 43,8 \text{ кА (погрешность 0,3 \%)}.$$

С учетом сказанного выше, находим наибольшее действующее значение полного тока КЗ

$$I_y = I_{(0)\Sigma}'' \sqrt{1 + 2(K_{y(c)} - 1)^2} = 16,39 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,89 - 1)^2} = 26,35 \text{ кА}.$$

3. Расчет периодического тока для времени $\tau = 0,2$ с

Периодическая слагаемая тока от системы во времени не изменяется, т. е. $I_{п\tau} = I_{(0)}'' = 12,62$ кА.

Периодические слагаемые тока АД и СД со временем затухают и определяются по соответствующим типовым кривым.

Рассчитаем параметр $I_{п(0)*ном}$ для АД:

$$I_{п(0)*ном} = \frac{I_{(0)ад}''}{I_{ном}} = \frac{0,426}{0,09} = 4,73,$$

и по кривым (см. рис. 5.5) находим $\gamma_{ад} = 0,08$; для СД серии СДН по кривым (см. рис. 5.3) определяем $\gamma_{сд} = 0,6$.

Результирующий периодический ток в месте КЗ для $\tau = 0,2$ с, с учетом его затухания, находим по выражению:

$$I_{п\Sigma\tau} = I''_{(0)c} + \gamma_{ад} I''_{(0)ад} + \gamma_{сд} I''_{(0)сд} = \\ = 12,62 + 0,08 \cdot 0,426 + 0,6 \cdot 3,344 = 14,64 \text{ кА},$$

что составляет 0,89 от начального значения.

Пример 5.2

Для принципиальной схемы электроснабжения, приведенной на рис. 5.7, а, при трехфазном коротком замыкании в точке К для момента $t = 0$ определить:

- суммарное значение периодической слагаемой тока КЗ;
- ударный ток;
- остаточное напряжение в узле F;

для момента $\tau = 0,15$ с определить:

- суммарное значение периодической слагаемой тока КЗ;
- действующее значение полного тока КЗ, протекающего через выключатель В.

Исходные данные

Параметры элементов схемы при $n > 1$ даны на один элемент.

Система: $U_c = 515$ кВ, $I_{отк.ном} = 29$ кА, $x_c/R_c = 10$.

Автотрансформаторы АТ1:

АОДЦН: $\frac{500}{\sqrt{3}} / \frac{230}{\sqrt{3}} / 11$ кВ, $n = 2$, $S_{ном} = 3 \cdot 167 = 501$ МВА,

$U_{В-С} = 9,5$ %, $U_{В-Н} = 29$ %, $U_{С-Н} = 17,5$ %;

$\Delta P_{К(В-С)} = 325$ кВт, $\Delta P_{К(В-Н)} = 95$ кВт, $\Delta P_{К(С-Н)} = 80$ кВт.

Турбогенераторы ТГ:

ТВФ-120-2: $n = 3$, $S_{ном} = 125$ МВА, $U_{ном} = 10,5$ кВ, $I_{ном} = 6,875$ кА, $\cos \varphi = 0,8$, $x''_d = 0,192$.

Трансформаторы Т2:

ТДЦН: 230/10,5 кВ, $n = 3$, $S_{ном} = 125$ МВА, $U_K = 12$ %, $\Delta P_K = 380$ кВт.

Трансформатор Т1:

ТРДЦН: 230/6,6 кВ, $n = 1$, $S_{ном} = 63$ МВА, $K_p = 3,5$, $U_{В-Н} = 11,5$ %, $\Delta P_{К(В-Н)} = 300$ кВт.

Воздушные линии:

$3 \times \text{АСО-400}$, $n = 2$, $U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ кВ}$, $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$;

$R_0 = 0,08 \text{ Ом/км}$, $L1 = 50 \text{ км}$, $L2 = 30 \text{ км}$.

Асинхронные двигатели:

АД-1 серии АТД, $n_1 = 2$, $P_{\text{НОМ}} = 1600 \text{ кВт}$, $U_{\text{НОМ}} = 6 \text{ кВ}$; $U_{\text{раб}} = 6,3 \text{ кВ}$,
 $I_{\text{НОМ}} = 178 \text{ А}$, $I_{\text{пуск}^*} = 5,5$, $\cos \varphi = 0,91$; $K_{\text{заг}} = 0,4$ – коэффициент загрузки.

Синхронные двигатели:

СД-2 серии СТД, $n_2 = 2$, $P_{\text{НОМ}} = 3200 \text{ кВт}$, $U_{\text{НОМ}} = 6 \text{ кВ}$;

$U_{\text{раб}} = 6,3 \text{ кВ}$, $I_{\text{НОМ}} = 352 \text{ А}$, $I_{\text{пуск}^*} = 6,63$, $\cos \varphi = 0,9$, $K_{\text{заг}} = 0,6$;

СД-3 серии СТД, $n_3 = 1$, $P_{\text{НОМ}} = 6300 \text{ кВт}$, $U_{\text{НОМ}} = 6 \text{ кВ}$;

$U_{\text{раб}} = 6,3 \text{ кВ}$, $I_{\text{НОМ}} = 696 \text{ А}$, $I_{\text{пуск}^*} = 6,28$, $\cos \varphi = 0,9$, $K_{\text{заг}} = 0,55$.

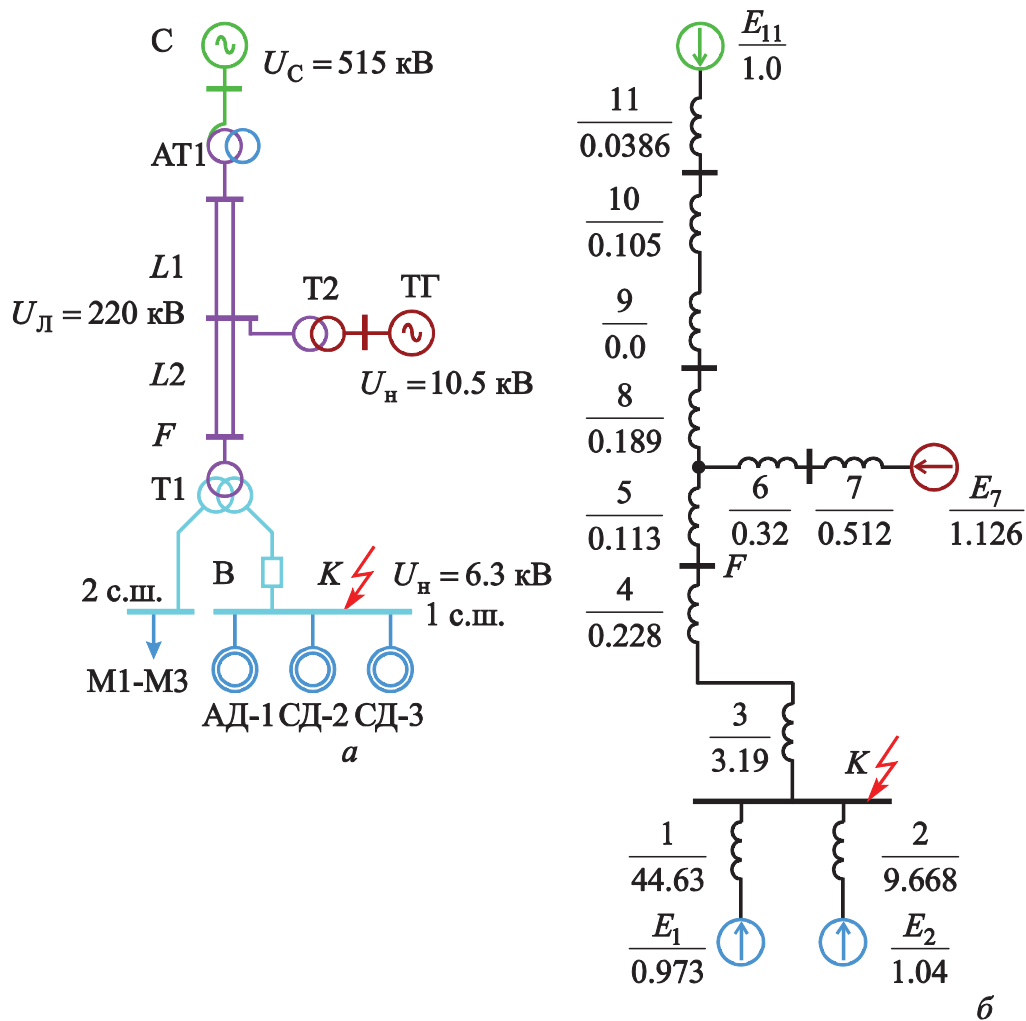


Рис. 5.7. К примеру 5.2: а – принципиальная схема; б – схема замещения

Решение

Состав и параметры двигательной нагрузки на обеих секциях шин в 6,3 кВ считаем одинаковыми. Влиянием двигателей второй секции шин пренебрегаем. При расчете токов короткого замыкания учитываем только реактивные сопротивления элементов; активные сопротивления используем для определения постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ.

1. Расчет параметров схемы замещения по рис. 5.7, б

Принимаем: $S_{\sigma} = 1000$ МВА, $U_{\sigma i} = U_{\text{ср.ном.}i}$, $I_{\sigma i} = S_{\sigma} / \sqrt{3} U_{\sigma i}$;

$U_{\sigma 1} = 6,3$ кВ, $U_{\sigma 2} = 10,5$ кВ, $U_{\sigma 3} = 230$ кВ, $U_{\sigma 4} = 515$ кВ;

$I_{\sigma 1} = 91,75$ кА, $I_{\sigma 2} = 55$ кА, $I_{\sigma 3} = 2,51$ кА, $I_{\sigma 4} = 1,12$ кА.

Вычисляем сопротивления и сверхпереходные ЭДС элементов схемы замещения в относительных единицах при принятых базисных условиях.

1.1. Асинхронные двигатели АД-1

Два двигателя представляем одним эквивалентным с параметрами:

$$x_{1*} = \frac{1}{n_1 I_{\text{пуск}*}} \frac{U_{\text{ном}} I_{\sigma 1}}{I_{\text{ном}} U_{\sigma 1}} = \frac{1}{2 \cdot 5,5} \cdot \frac{6 \cdot 91,75}{0,178 \cdot 6,3} = 44,63, \quad U_{p*} = \frac{U_p}{U_{\sigma 1}} = \frac{6,3}{6,3} = 1;$$

$$I_{\text{раб}*} = \frac{K_{\text{заг}} n_1 I_{\text{ном}}}{I_{\sigma 1}} = \frac{0,4 \cdot 2 \cdot 0,178}{91,75} = 0,001552;$$

$$E_{1*}'' = \sqrt{(U_{p*} \cos \varphi)^2 + (U_{p*} \sin \varphi - I_{\text{раб}*} x_{1*})^2} = \\ = \sqrt{(1 \cdot 0,91)^2 + (1 \cdot 0,414 - 0,001552 \cdot 44,63)^2} = 0,973.$$

1.2. Синхронные двигатели СД-2, СД-3

Два двигателя СД-2 и два двигателя СД-3 заменяем одним эквивалентным с параметрами:

$$I_{\Sigma \text{пуск}} = n_2 I_{2\text{пуск}*} I_{2\text{ном}} + n_3 I_{3\text{пуск}*} I_{3\text{ном}} = 2 \cdot 6,63 \cdot 352 + 6,28 \cdot 696 = 9038,4 \text{ А};$$

$$x_{2*} = \frac{1}{I_{\Sigma \text{пуск}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}} I_{\sigma 1}}{U_{\sigma 1}} = \frac{6 \cdot 91,75}{9,0384 \cdot 6,3} = 9,668;$$

$$I_{\text{раб}*} = \frac{K_{2\text{заг}} n_2 I_{2\text{ном}} + K_{3\text{заг}} n_3 I_{3\text{ном}}}{I_{\sigma 1}} = \frac{0,6 \cdot 2 \cdot 0,352 + 0,55 \cdot 1 \cdot 0,696}{91,75} = 0,00877;$$

$$E_{2*}'' = \sqrt{(1 \cdot 0,9)^2 + (1 \cdot 0,436 + 0,00877 \cdot 9,668)^2} = 1,04.$$

1.3. Для трансформатора Т1 с расщепленной обмоткой

$$x_{3*} = 1,75 \frac{U_{(B-H)} S_{\delta}}{100 S_{\text{НОМ}}} = 1,75 \cdot 0,115 \cdot \frac{1000}{63} = 3,19;$$

$$x_{4*} = 0,125 \cdot 0,115 \cdot \frac{1000}{63} = 0,228;$$

$$R_{3*} = R_{4*} = \frac{\Delta P_{K(B-H)} U_{\text{НОМ}}^2 S_{\delta}}{2 S_{\text{НОМ}}^2 U_{63}^2} = \frac{0,3 \cdot 230^2 \cdot 1000}{2 \cdot 63^2 \cdot 230^2} = 38 \cdot 10^{-3}.$$

1.4. Трансформаторы Т2

Три блочных трансформатора представляем эквивалентной ветвью:

$$x_{6*} = \frac{0,12 \cdot 1000}{3 \cdot 125} = 0,32, \quad R_{6*} = \frac{0,38 \cdot 1000}{3 \cdot 125^2} = 8 \cdot 10^{-3}.$$

1.5 Автотрансформаторы АТ-1

Две группы из трех однофазных автотрансформаторов представляем эквивалентными ветвями среднего и высшего напряжений (обмотка низшего напряжения находится в режиме холостого хода):

$$U_{K(B)} = 0,5 [U_{K(B-C)} + U_{K(B-H)} - U_{K(C-H)}] = 10,5 \%;$$

$$U_{K(C)} = 0,5 [U_{K(B-C)} + U_{K(C-H)} - U_{K(B-H)}] = -1 \% \approx 0;$$

$$U_{K(H)} = 0,5 [U_{K(B-H)} + U_{K(C-H)} - U_{K(B-C)}] = 18,5 \%.$$

По аналогичным выражениям находим

$$\Delta P_{K(B)} = 170 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{K(C)} = 155 \text{ кВт},$$

тогда

$$x_{9*} = x_{c*} = 0, \quad x_{10*} = x_{B*} = \frac{U_{K(B)} S_{\delta}}{100 n S_{\text{НОМ}}} = \frac{0,105 \cdot 1000}{2 \cdot 501} = 0,105;$$

$$R_{9*} = \frac{\Delta P_{K(C)} S_{\delta}}{n S_{\text{НОМ}}^2} = \frac{0,155 \cdot 1000}{2 \cdot 501^2} = 3 \cdot 10^{-4}, \quad R_{10*} = 3,4 \cdot 10^{-4}.$$

1.6. Турбогенераторы ТГ

Три блочных генератора представляем одним эквивалентным с параметрами:

$$x_{7*} = \frac{x_d'' S_{\delta}}{n S_{\text{НОМ}}} = \frac{0,192 \cdot 1000}{3 \cdot 125} = 0,512; \quad I_{\text{НОМ}*} = \frac{n I_{\text{НОМ}}}{I_{62}} = \frac{3 \cdot 6,875}{55} = 0,375;$$

$$E_{7*}'' = \sqrt{(U_{\text{НОМ}*} \cos \varphi)^2 + (U_{\text{НОМ}*} \sin \varphi + I_{\text{НОМ}*} x_{7*})^2} = 1,126.$$

1.7. Система С имеет ЭДС $E_{c*} = 1$; ее эквивалентную реактивность находим по отключающей способности выключателя:

$$x_{11*} = \frac{I_{64}}{I_{\text{отк.ном.}}} = \frac{1,12}{29} = 0,0386, R_{11*} = x_{11*} / 10 = 3,86 \cdot 10^{-3}.$$

1.8. Двухцепные воздушные линии электропередачи представляем эквивалентными сопротивлениями:

$$L1 \quad x_{8*} = \frac{x_0 L S_6}{n U_{63}^2} = \frac{0,4 \cdot 50 \cdot 1000}{2 \cdot 230^2} = 0,189, R_{8*} = 37,8 \cdot 10^{-3};$$

$$L2 \quad x_{5*} = 0,113, R_{5*} = 22,7 \cdot 10^{-3}.$$

2. Расчет параметров аварийного режима при $t = 0$

2.1. В результате упрощения схемы (рис. 5.8) находим:

$$x_{12*} = x_{8*} + x_{9*} + x_{10*} + x_{11*} = 0,333;$$

$$x_{13*} = x_{6*} + x_{7*} = 0,832;$$

$$x_{14*} = x_{3*} + x_{4*} + x_{5*} = 3,531;$$

$$x_{15*} = x_{12*} // x_{13*} + x_{14*} = 3,77;$$

$$E''_{15*} = E''_{7*} // E''_{11*} = 1,036.$$

Аналогично расчету x_{15} находим активное сопротивление этой ветви $R_{15*} = 0,1054$. Это позволяет определить эквивалентную постоянную времени затухания апериодической слагаемой тока КЗ, посылаемого системой и турбогенераторами:

$$T_{a.СГ} = \frac{3,77}{314 \cdot 0,1036} = 0,114 \text{ с.}$$

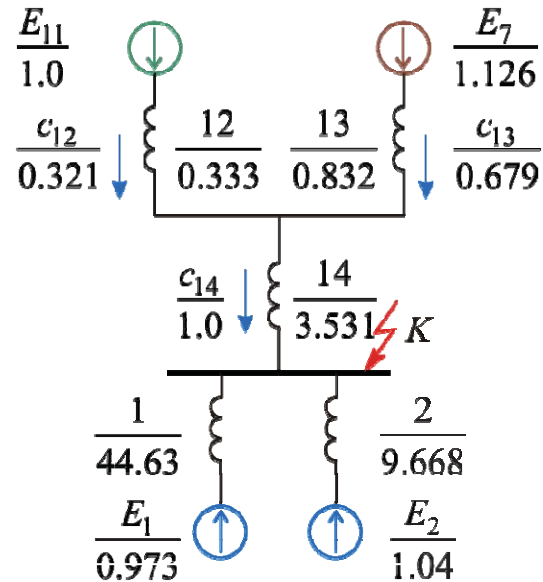


Рис. 5.8. Упрощенная схема замещения

2.2. Расчет собственно параметров аварийного режима для $t = 0$

• Суммарное начальное значение периодической составляющей тока в месте КЗ, создаваемого источниками «С+Г», АД, СД,

$$\begin{aligned} I''_{(0)\Sigma*} &= I''_{(0)С+Г*} + I''_{(0)ад*} + I''_{(0)сд*} = \frac{E''_{15*}}{x_{15*}} + \frac{E''_{1*}}{x_{1*}} + \frac{E''_{2*}}{x_{2*}} = \\ &= \frac{1,036}{3,77} + \frac{0,973}{44,63} + \frac{1,04}{9,668} = 0,2748 + 0,022 + 0,107 = 0,404. \end{aligned}$$

А в именованных единицах для степени напряжения $U_{\delta 1}$

$$I''_{0\Sigma} = 91,75 \cdot (0,2748 + 0,022 + 0,107) = 25,21 + 2,018 + 9,817 = 37,04 \text{ кА.}$$

Находим ударные коэффициенты для выделенных источников питания:

для «С+ТГ» по расчетному выражению (3.10), при $T_{a(\text{сг})} = 0,114 \text{ с}$,

$$K_{y(\text{сг})} = 1 + e^{-0,01/0,114} = 1,916;$$

для АД по табл. 4.4 для серии АДД имеем $K_{y\text{АД}} = 1,69$;

для эквивалентного СД рассчитаем усредненную постоянную времени

$$\begin{aligned} T_{a(\text{сд})} &= (T_{a(\text{м}2)} \cdot n_2 I_{2\text{пуск}} * I_{2\text{ном}} + T_{a(\text{м}3)} \cdot n_3 I_{3\text{пуск}} * I_{3\text{ном}}) / I_{\Sigma\text{пуск}} = \\ &= (0,07 \cdot 2 \cdot 6,63 \cdot 352 + 0,092 \cdot 1 \cdot 6,28 \cdot 696) / 9038,4 = 0,08 \text{ с,} \end{aligned}$$

где $T_{a(\text{м}2)}$, $T_{a(\text{м}3)}$ приняты по табл. 4.3 и расчетное $K_{y(\text{сд})} = 1,88$.

- Результирующее значение ударного тока в точке К

$$\begin{aligned} i_{y\Sigma} &= \sqrt{2} (I''_{(0)\text{сг}} K_{y(\text{сг})} + I''_{(0)\text{ад}} K_{y(\text{ад})} + I''_{(0)\text{сд}} K_{y(\text{сд})}) = \\ &= \sqrt{2} \cdot (25,21 \cdot 1,916 + 2,018 \cdot 1,69 + 9,817 \cdot 1,88) = 99,22 \text{ кА.} \end{aligned}$$

- Остаточное межфазное напряжение в узле F (см. рис. 5.7,б)

$$\begin{aligned} U_F &= I''_{(0)\text{сг}*} (x_{3*} + x_{4*}) U_{\delta 3} = 0,2748 \cdot (3,19 + 0,228) \cdot 230 = \\ &= 0,9393 \cdot 230 = 216 \text{ кВ.} \end{aligned}$$

3. Расчет параметров аварийного режима для $\tau = 0,15 \text{ с}$

Для индивидуального учета источников E''_{11} и E''_7 рассчитаем для этой части схемы (см. рис. 5.8) коэффициенты c по данным для $t = 0$:

$$c_{12} = \frac{c_{14} x_{13*} + (E''_{11*} - E''_{7*}) / I''_{(0)\text{сг}*}}{x_{12*} + x_{13*}} = \frac{1 \cdot 0,832 + (1 - 1,126) / 0,2748}{0,333 + 0,832} = 0,321;$$

$$c_{13} = 1 - 0,321 = 0,679.$$

Периодическая слагаемая тока генератора при $t = 0$, приведенная к напряжению $U = 10,5 \text{ кВ}$, составляет

$$I''_{(0)\Gamma} = I''_{(0)\Gamma+\text{с}*} c_{13} I_{\delta 2} = 0,2748 \cdot 0,679 \cdot 55 = 10,26 \text{ кА}$$

и в относительных единицах на базе $I_{\Sigma\Gamma(\text{ном})}$ –

$$I_{(0)\Gamma*\text{ном}} = \frac{I''_{(0)\Gamma}}{I_{\Sigma\Gamma(\text{ном})}} = \frac{10,26}{3 \cdot 6,875} = 0,497.$$

Величина $I_{(0)\Gamma^*\text{НОМ}}$ определяет условную электрическую удаленность генератора до узла КЗ. Поскольку $I_{(0)\Gamma^*\text{НОМ}} < 1$, то генераторы ведут себя, как источник неизменного напряжения, и периодическая слагаемая от времени не зависит. Это справедливо и для системы, т. е.

$$I_{(c-\Gamma)\tau} = I''_{(0)c-\Gamma} = 25,21 \text{ кА.}$$

Короткое замыкание произошло на выводах асинхронного двигателя, поэтому кратность тока КЗ велика:

$$I_{(0)\text{ад}^*\text{НОМ}} = \frac{I_{(0)\text{ад}}}{I_{\Sigma\text{ад(НОМ)}}} = \frac{2,018}{2 \cdot 0,178} = 5,7;$$

по расчетным кривым (см. рис. 5.5) для момента времени $\tau = 0,15$ находим $\gamma_{\text{ад}} = 0,05$.

Для синхронных двигателей по расчетным кривым (см. рис. 5.3) находим $\gamma_{\text{сд}} = 0,6$.

- Подсчитываем результирующее значение периодической слагаемой тока КЗ для $\tau = 0,15$ с:

$$I_{\Sigma\tau} = I_{c-\Gamma} + \gamma_{\text{ад}} I''_{(0)\text{ад}} + \gamma_{\text{сд}} I''_{(0)\text{сд}} = 25,21 + 0,05 \cdot 2,018 + 0,6 \cdot 9,817 = 31 \text{ кА.}$$

- Находим действующее значение полного тока КЗ, протекающего через выключатель В, для времени $\tau = 0,15$ с:

$$I_{\tau} = \sqrt{I_{\text{п}(c-\Gamma)}^2 + i_{a(c-\Gamma)}^2} = \sqrt{25,21^2 + 9,56^2} = 26,96 \text{ кА,}$$

$$\text{где } i_{a(c-\Gamma)} = \sqrt{2} I_{\text{п}(c-\Gamma)} e^{-\tau/T_{a(c-\Gamma)}} = \sqrt{2} \cdot 25,21 e^{-0,15/0,114} = 9,56 \text{ кА.}$$

Контрольные вопросы

1. Что понимается под коэффициентами токораспределения и какова суть их практического приложения?
2. В каких случаях возникает необходимость обращаться к типовым кривым для расчета периодической слагаемой тока КЗ?
3. Каким параметром характеризуется условная электрическая удаленность источников питания от места короткого замыкания?
4. Какими параметрами учитываются генераторы, синхронные и асинхронные двигатели при расчете режима КЗ?
5. При каких условиях рекомендуется учитывать двигательную нагрузку при расчете режима КЗ?

Глава 6

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТОКОВ ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Несимметричные режимы в электрических системах возникают вследствие *несимметричных коротких замыканий или обрыва одной или двух фаз линии*. В первом случае *несимметрия называется поперечной*, во втором – *продольной*. При несимметрии напряжения и токи в фазах различны, углы сдвига одноименных векторов отличаются от 120° . Если для анализа несимметрии основываться на подходе, используемом для симметричных режимов, то потребуются составлять трехфазную схему замещения и формировать полную систему уравнений с учетом взаимоиנדукции. Такой подход существенно усложняет решение задачи, особенно для синхронных машин.

Сравнительно просто и вместе с тем достаточно строго анализ несимметричных режимов осуществляется *методом симметричных составляющих*. Как будет показано ниже, вычисление токов и напряжений при несимметричных КЗ на базе метода симметричных составляющих сводится к вычислению этих величин при некотором фиктивном трехфазном коротком замыкании. Это представляет возможность вновь воспользоваться однолинейной схемой замещения и вести расчет на одну фазу. В этом одно из основных достоинств метода симметричных составляющих.

6.1. Метод симметричных составляющих

Известно, что произвольную несимметричную систему трех векторов тока $\mathbf{I}_A, \mathbf{I}_B, \mathbf{I}_C$ или напряжения можно однозначно разложить на три симметричные системы (см. рис. 6.1):

$\mathbf{I}_{a1}, \mathbf{I}_{b1}, \mathbf{I}_{c1}$ – система токов *прямой последовательности*;

$\mathbf{I}_{a2}, \mathbf{I}_{b2}, \mathbf{I}_{c2}$ – система токов *обратной последовательности*;

$\mathbf{I}_{a0}, \mathbf{I}_{b0}, \mathbf{I}_{c0}$ – система токов *нулевой последовательности*.

Симметричная система токов прямой последовательности представляет три одинаковых по величине вектора с относительным сдвигом по фазе в 120° , вращающихся против часовой стрелки. Чередование фаз A, B, C принимается по часовой стрелке. Аналогичные условия имеем для обратной последовательности с чередованием фаз A, C, B . Система нулевой последовательности существенно отличается от прямой и обратной тем, что отсутствует сдвиг фаз.

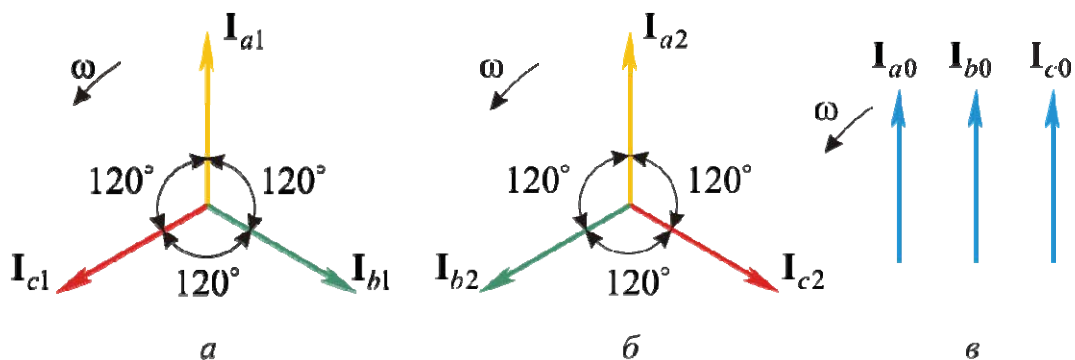


Рис. 6.1. Симметричная система токов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Нулевая система токов, по существу, представляет три однофазных тока, для которых три провода трехфазной цепи представляют прямой провод, а обратным проводом служит земля или четвертый (нулевой), по которому возвращается $3\mathbf{I}_0$.

Согласно условию разложения несимметричной системы токов \mathbf{I}_A , \mathbf{I}_B , \mathbf{I}_C на три симметричные системы имеем:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_A &= \mathbf{I}_{a1} + \mathbf{I}_{a2} + \mathbf{I}_{a0}; \\ \mathbf{I}_B &= \mathbf{I}_{b1} + \mathbf{I}_{b2} + \mathbf{I}_{b0}; \\ \mathbf{I}_C &= \mathbf{I}_{c1} + \mathbf{I}_{c2} + \mathbf{I}_{c0}. \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Введем комплексное число a , называемое оператором фазы;

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Этот вектор единичной длины имеет аргумент, равный 120° . Если некоторый вектор, например \mathbf{I}_{a1} , умножить на a , то это означает повернуть \mathbf{I}_{a1} на 120° против часовой стрелки, т. е.

$$a\mathbf{I}_{a1} = \mathbf{I}_{c1}.$$

Для оператора фазы справедливы отношения:

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^3 = 1, \quad a + a^2 + a^3 = 0.$$

Принимая фазу A за основную, можно с помощью оператора a выразить токи фаз B и C через ток фазы A . Это позволяет в формулах (6.1) использовать только систему векторов фазы A :

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_{a1} + \mathbf{I}_{a2} + \mathbf{I}_0; \quad (6.2)$$

$$\mathbf{I}_B = a^2\mathbf{I}_{a1} + a\mathbf{I}_{a2} + \mathbf{I}_0; \quad (6.3)$$

$$\mathbf{I}_C = a\mathbf{I}_{a1} + a^2\mathbf{I}_{a2} + \mathbf{I}_0. \quad (6.4)$$

Здесь, в силу равенства $\mathbf{I}_{a0} = \mathbf{I}_{b0} = \mathbf{I}_{c0}$, индекс фазы у нулевой последовательности вообще упущен. Уравнения (6.2)–(6.4) позволяют определить несимметричную систему токов при известных симметричных составляющих. Обратная задача заключается в нахождении симметричных составляющих токов для заданной несимметричной системы. Эта зависимость получается решением уравнений (6.2)–(6.4) относительно симметричных составляющих токов:

$$\mathbf{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_A + a\mathbf{I}_B + a^2\mathbf{I}_C); \quad (6.5)$$

$$\mathbf{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_A + a^2\mathbf{I}_B + a\mathbf{I}_C); \quad (6.6)$$

$$\mathbf{I}_0 = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C). \quad (6.7)$$

Все приведенные соотношения в равной мере справедливы и для напряжений.

Системы прямой и обратной последовательностей являются симметричными и уравновешенными; система нулевой последовательности является симметричной, но неуравновешенной. Из соотношения (6.7) следует, что сумма трех несимметричных векторов тока равна утроенному току нулевой последовательности:

$$3\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C, \quad (6.8)$$

который протекает (возвращается) в земле или по нулевому проводу.

Элементы электрической системы обладают конструктивной симметрией, что отражается в равенстве их фазных сопротивлений:

$$Z_A = Z_B = Z_C. \quad (6.9)$$

При выполнении этих условий справедлив принцип *независимости действия симметричных составляющих*. Для воздушных линий соблюдение условия (6.9) достигается транспозицией проводов.

Суть этого принципа состоит в том, что в трехфазной системе с симметричными элементами напряжение какой-либо последовательности вызывает протекание тока только одноименной последовательности. Точно так же ток одной из последовательностей вызывает падение напряжения только своей последовательности, т. е.

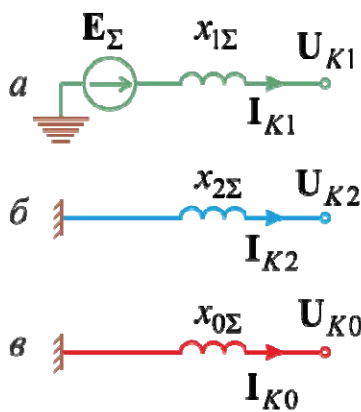
$$\Delta U_1 = \mathbf{I}_1 \mathbf{Z}_1, \quad \Delta U_2 = \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_2, \quad \Delta U_0 = \mathbf{I}_0 \mathbf{Z}_0. \quad (6.10)$$

Можно сказать, что электрические контуры как бы обладают отдельными каналами избирательности прямой, обратной и нулевой последовательностей, по которым могут протекать токи лишь соответствующих последовательностей. Выполнение принципа независимости действия симметричных составляющих практически очень важно, по-

сколькx позволяет каждую последовательность рассматривать независимо (автономно) от других последовательностей.

Из условия (6.10) следует, что один и тот же элемент в общем случае оказывает разные сопротивления при протекании по нему тока прямой, обратной или нулевой последовательности. Это характерно для трехфазной сети, в которой проявление взаимной индуктивности между фазами зависит от протекающей последовательности токов.

По своей природе синхронные машины генерируют симметричную систему векторов ЭДС только прямой последовательности, а ЭДС обратной и нулевой последовательностей равны нулю. При несимметричном КЗ по месту повреждения возникают несимметричные напряжения, которые можно представить как геометрическую сумму симметричных составляющих напряжений U_{K1} , U_{K2} , U_{K0} . В соответствии с этим для эквивалентных однолинейных схем прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 6. 2.) уравнения второго закона Кирхгофа можно записать в следующем виде:



$$U_{K1} = E_{\Sigma} - I_{K1}jx_{1\Sigma}; \quad (6.11)$$

$$U_{K2} = 0 - I_{K2}jx_{2\Sigma}; \quad (6.12)$$

$$U_{K0} = 0 - I_{K0}jx_{0\Sigma}, \quad (6.13)$$

где U_{K1} , U_{K2} , U_{K0} , I_{K1} , I_{K2} , I_{K0} – симметричные составляющие напряжения и тока в месте КЗ; E_{Σ} – результирующая ЭДС схемы прямой последовательности относительно точки КЗ; $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$ – результирующие реактивности схем соответствующих последовательностей относительно точки короткого замыкания.

Из уравнений (6.12), (6.13) следует, что токи обратной и нулевой последовательностей определяются соответственно только напряжениями обратной и нулевой последовательностей в точке короткого замыкания.

Система уравнений (6.11)–(6.13) содержит шесть неизвестных: три симметричных составляющих напряжения и три симметричных составляющих тока. Недостающие для расчета этих величин уравнения (три) получают из граничных условий для конкретного вида нарушения симметрии.

6.2. Сопротивления обратной и нулевой последовательностей для элементов электрической системы

Каждый элемент электрической системы при расчетах несимметричных режимов характеризуется сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей. Все сопротивления элементов системы, которыми они представлялись в расчетах симметричного трехфазного КЗ, являлись сопротивлениями прямой последовательности.

При отсутствии взаимоиндукции между фазами элемента его реактивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей одинаковы, т. к. они обусловлены только собственной индуктивностью фазы. Это условие справедливо только для реактора, т. е.

$$x_1 = x_2 = x_0, \quad r_1 = r_2 = r_0.$$

При наличии магнитной связи между фазами реактивное сопротивление силового элемента определяется с учетом этого влияния, которое зависит от последовательности протекающих токов. Для элемента, магнитно связанные цепи которого неподвижны относительно друг друга (трансформаторы, воздушные и кабельные линии), сопротивления прямой и обратной последовательностей равны, т. к. от перемены чередования фаз влияние взаимной индукции не изменяется ($x_1 = x_2, \quad r_1 = r_2$).

Реактивное сопротивление нулевой последовательности элементов резко отличается от реактанса прямой последовательности в силу иного проявления взаимоиндукции при протекании токов нулевой последовательности. Это отличие обусловлено тем, что токи нулевой последовательности совпадают по фазам.

6.2.1. Синхронные машины

Токи обратной последовательности создают магнитный поток, который перемещается в пространстве навстречу вращению ротора, т. е. их взаимное перемещение происходит с двойной угловой скоростью (2ω). Следовательно, поток обратной последовательности при своем перемещении встречает различное магнитное сопротивление, которое колеблется в пределах сопротивлений в продольной и поперечной осях машины. Этим условиям соответствуют расчетные выражения:

$$x_2 = \frac{2x_d''x_q''}{x_d'' + x_q''}, \quad x_2 = \frac{2x_d'x_q}{x_d' + x_q} \quad (6.14)$$

– соответственно для машин с демпферными обмотками и без них.

Значения x_2 приводятся в каталогах и справочниках как паспортный параметр машины. При отсутствии этих данных в качестве прибли-

женных значений можно принимать для машин с успокоительными обмотками $x_2 = 1,22x_d''$ и для явнополюсных машин без успокоительных обмоток $x_2 = 1,45x_d'$. В приближенных практических расчетах обычно идут на дополнительное упрощение, полагая для турбогенераторов и машин с продольно-поперечными успокоительными обмотками $x_2 \approx x_d''$.

Токи нулевой последовательности в фазах статорной цепи создают одинаковые по величине магнитные потоки. В силу физического сдвига обмоток фаз на 120° магнитные потоки нулевой последовательности в пространстве также сдвинуты на 120° , и их результирующее значение в расточке машины равно нулю и реакции ротора не вызывает. Реактивное сопротивление нулевой последовательности синхронных машин определяется только сопротивлением рассеяния (x_σ), причем по значению оно меньше, чем в прямой последовательности. Это уменьшение зависит от типа обмотки, из-за чего реактанс нулевой последовательности колеблется в широком диапазоне:

$$x_0 = (0,15 \dots 0,6)x_d''.$$

6.2.2. Асинхронные двигатели и обобщенная нагрузка

По отношению к магнитному потоку обратной последовательности ротор асинхронного двигателя имеет скольжение $s_{(2)} = 2 - s$. Зависимость относительной реактивности асинхронного двигателя от скольжения показана на рис. 6.3.

С ростом скольжения реактивное сопротивление x_s вначале резко падает. В интервале скольжения от $s = 1$ до $s = 2 - s_{\text{НОМ}}$ изменение сопротивления x_s мало, поэтому можно считать, что

$$x_2 \approx x_{s=1} = x'',$$

т. е. реактивность обратной последовательности x_2 равна его так называемой реактивности КЗ (сверхпереходной реактивности).

Сопротивление нулевой последовательности асинхронного двигателя практически равно ре-

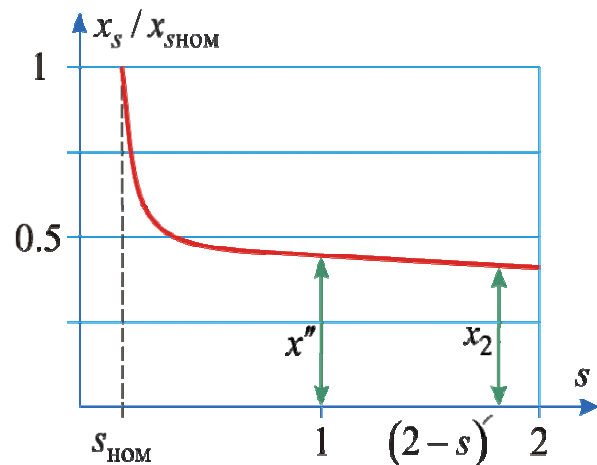


Рис. 6.3. К определению x_2 асинхронного двигателя

двигателя практически равно реактивности рассеяния статорной обмотки. Оно зависит от типа и конструкции двигателя и должно определяться опытным путем или по данным завода-изготовителя.

Для обобщенной нагрузки, состоящей преимущественно из асинхронных двигателей, сопротивление обратной последовательности равно сопротивлению прямой последовательности, т. е. $x_2 = 0,35$. Эта реактивность отнесена к полной рабочей мощности нагрузки ($S_{\text{наг}}$) и среднему номинальному напряжению ($U_{\text{ср}}$) той ступени, к которой она присоединена. Сопротивление нулевой последовательности обобщенной нагрузки определяется параметрами сети и трансформаторов, входящих в ее состав, и может быть получено только на основе прямого эквивалентирования.

6.2.3. Трансформаторы и автотрансформаторы

Реактивное сопротивление нулевой последовательности трансформаторов зависит от двух факторов: конструктивного исполнения и схемы соединения обмоток. По конструктивному исполнению трехфазные трансформаторы подразделяются на *трех-, четырех-, пятистержневые и группу из трех однофазных*. По типу соединения обмоток различают соединение *в треугольник* (Δ), *звезду с изолированной нейтралью* (Y), *звезду с заземленной нейтралью* (Y_0). У трансформаторов небольшой мощности вторичные обмотки напряжением 0,4 кВ иногда соединяют в *зигзаг* (Z). Особенности таких трансформаторов изложены в работе [8].

Прежде всего выясним, в какой мере влияет каждый из названных факторов на величину реактанса нулевой последовательности.

Конструкция трансформаторов влияет на величину сопротивления ветви намагничивания $x_{\mu 0}$ схемы замещения нулевой последовательности (см. рис. 6.4, *a*), которое определяется током намагничивания $I_{\mu 0}$. Результирующий поток намагничивания нулевой последовательности $\Phi_{\mu 0}$, в отличие от $\Phi_{\mu 1}$, требует наличия замкнутого контура. В группе из трех однофазных трансформаторов, четырех- и пятистержневых трансформаторов это условие обеспечивается за счет свободного от обмоток стержня магнитопровода, поэтому для указанных конструкций ток намагничивания нулевой последовательности $I_{\mu 0}$ столь же мал, что и ток намагничивания $I_{\mu 1}$ ($I_{\mu 0} = I_{\mu 1} = 0,5 \dots 2 \%$). Следовательно, реактивность ветви намагничивания составит $x_{\mu 0} \approx 1 / 0,01 = 100$. Величина $x_{\mu 0}$

на 3–4 порядка превосходит сопротивления рассеяния обмоток трансформатора ($x_{I^*} = x_{II^*} = 0,06$). Это позволяет считать $x_{\mu 0} = \infty$.

Иные условия имеют место в трехфазных трехстержневых трансформаторах, где магнитные потоки нулевой последовательности вынуждены замыкаться через воздушную среду и кожух трансформатора. Это приводит к увеличению $I_{\mu 0}$ и соответственно к снижению $x_{\mu 0}$ ($x_{\mu 0^*} \approx 0,3 \dots 1,0$). Но учитывая, что сопротивление рассеяния обмоток значительно меньше $x_{\mu 0}$, для мощных трансформаторов напряжением 10 кВ и выше практически считают $x_{\mu 0} = \infty$. И лишь для маломощных трансформаторов такой конструкции напряжением 6 /0,4, 10/0,4 кВ значение $x_{\mu 0}$ учитывают как конечную величину (см. табл. 3 приложения).

Рассмотрим влияние схемы соединения обмоток трансформатора на реактивность x_0 . При коротком замыкании со стороны обмотки, соединенной в «треугольник» (Δ) или «звезду» без заземленной нейтрали (Y), сопротивление нулевой последовательности трансформатора бесконечно велико ($x_0 = \infty$). При этих условиях вообще исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе, независимо от схемы соединения его других обмоток. Конечная величина x_0 возможна только в том случае, когда КЗ происходит со стороны обмотки трансформатора, соединенной в «звезду» с заземленной нейтралью (Y_0).

Обратимся к количественной оценке реактанса нулевой последовательности трансформаторов и их схем замещения. Считаем, что несимметричное короткое замыкание происходит со стороны обмотки, соединенной по схеме (Y_0).

На рис. 6.4–6.6 слева изображены принципиальные трехфазные схемы соединения обмоток трансформаторов (автотрансформаторов), справа – однолинейные схемы замещения нулевой последовательности. В этих схемах каждая обмотка представлена своим сопротивлением рассеяния (x_I, x_{II}, x_{III}) и реактивностью ветви намагничивания нулевой последовательности ($x_{\mu 0}$). При определении путей протекания тока I_0 следует иметь в виду, что все фазы находятся в одинаковых условиях (симметричный режим), и со стороны КЗ (Y_0) к каждой из них приложено U_0 .

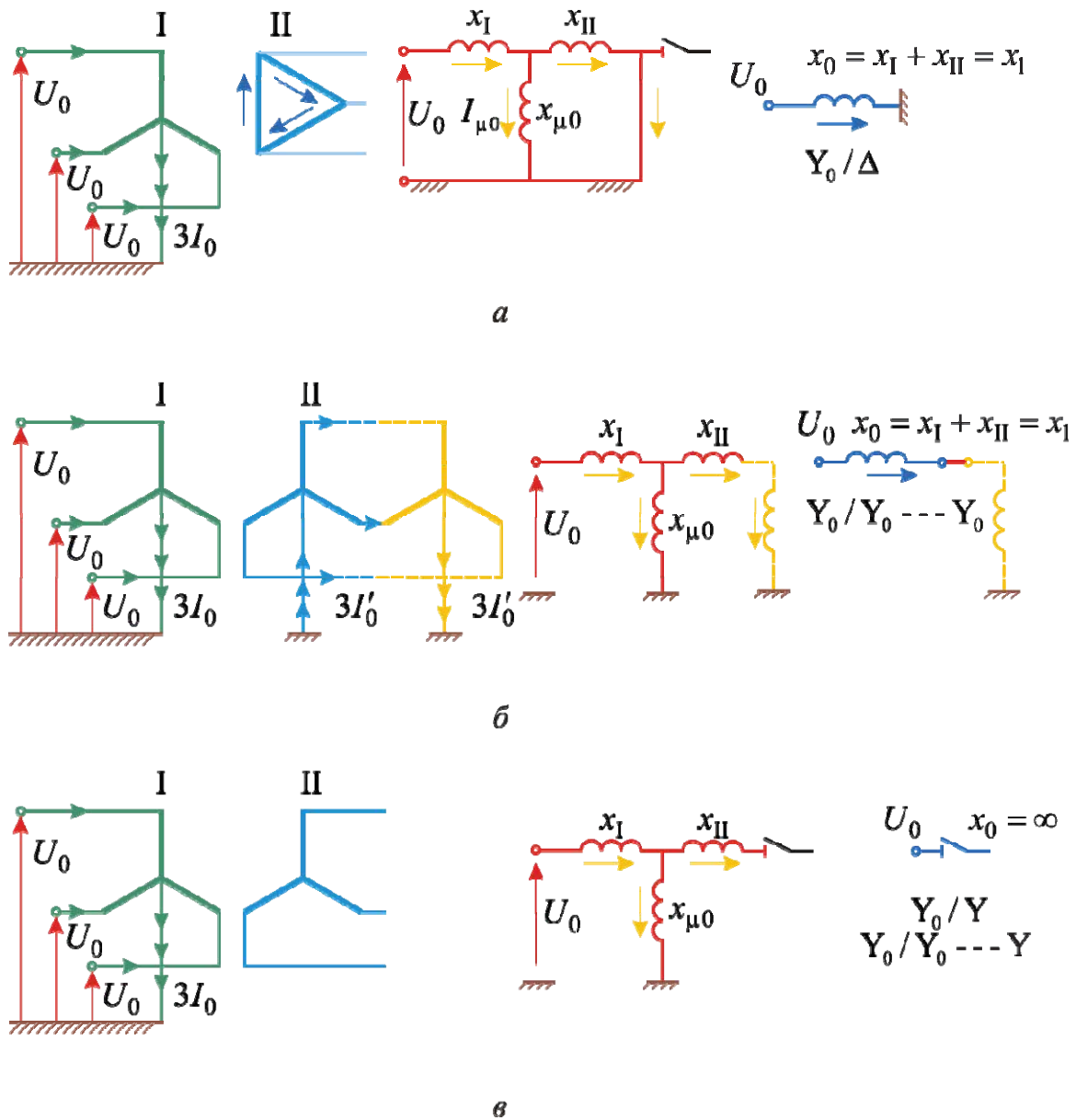


Рис. 6.4. Двухобмоточные трансформаторы. Схемы замещения нулевой последовательности для различных вариантов соединения обмоток

В двухобмоточном трансформаторе со схемой обмоток Y_0/Δ (рис. 6.4, а) напряжение нулевой последовательности вторичных обмоток будет вызывать токи, которые, подобно токам третьей гармоники, протекают только в этих обмотках, не выходя за их пределы. Завершение пути тока нулевой последовательности на ветви x_{II} на схеме замещения отражается ее закорачиванием на обратный провод (землю). Поскольку относительно большое сопротивление $x_{\mu 0}$ шунтируется малым сопротивлением x_{II} , независимо от конструкции трансформатора с со-

единением обмоток Y_0 / Δ , сопротивление x_0 принимается равным сопротивлению прямой последовательности x_1 , т. е.

$$x_0 \approx x_I + x_{II} = x_1. \quad (6.15)$$

При соединении обмоток по схеме Y_0 / Y_0 (см. рис. 6.4, б) предполагается, что на стороне обмотки II путь циркуляции токов обеспечен наличием по крайней мере еще одной заземленной нейтрали (штриховая линия). Принимая для любой конструкции $x_{\mu 0} = \infty$, имеем

$$x_0 \approx x_I + x_{II} = x_1.$$

Если же дополнительно заземленной нейтрали нет, то схема этого трансформатора (Y_0 / Y_0) будет такой же, как и при соединении обмоток по схеме Y_0 / Y (см. рис. 6.4, в), что соответствует режиму холостого хода трансформатора. При этих условиях

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

Схемы замещения трехобмоточных трансформаторов (см. рис. 6.5) строятся по тому же принципу, что и для двухобмоточных. В трехобмоточных трансформаторах одна из обмоток, как правило, соединена в «треугольник». Сопротивление рассеяния этой обмотки с малой реактивностью шунтирует ветвь $x_{\mu 0}$, что позволяет независимо от конструкции принимать $x_{\mu 0} = \infty$. По этой причине в схемах замещения эта ветвь не приведена.

На рис. 6.5, а в варианте соединения обмоток $Y_0 / \Delta / Y_0$ на стороне обмотки III предполагается наличие еще одной заземленной нейтрали, что обеспечивает контур для токов нулевой последовательности. Таким образом, все три обмотки обтекаются током, и трансформатор представляется полной схемой замещения.

При соединении обмоток по схеме $Y_0 / \Delta / Y$ (см. рис. 6.5, б) ток в контуре III отсутствует, а схема замещения представляется только обмотками I и II:

$$x_0 = x_I + x_{II} = x_{I-II}.$$

Для схемы (см. рис. 6.5, в) вполне очевидно, что

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

Схема замещения автотрансформатора (см. рис. 6.6, а) повторяет схему замещения трехобмоточного трансформатора (см. рис. 6.5, а) с аналогичным соединением обмоток. Нужно иметь в виду, что непосредственно из схемы замещения нулевой последовательности автотрансформатора нельзя получить ток, протекающий в его нейтрали. При указанных на рис. 6.6 направлениях токов искомым ток в нейтрали равен

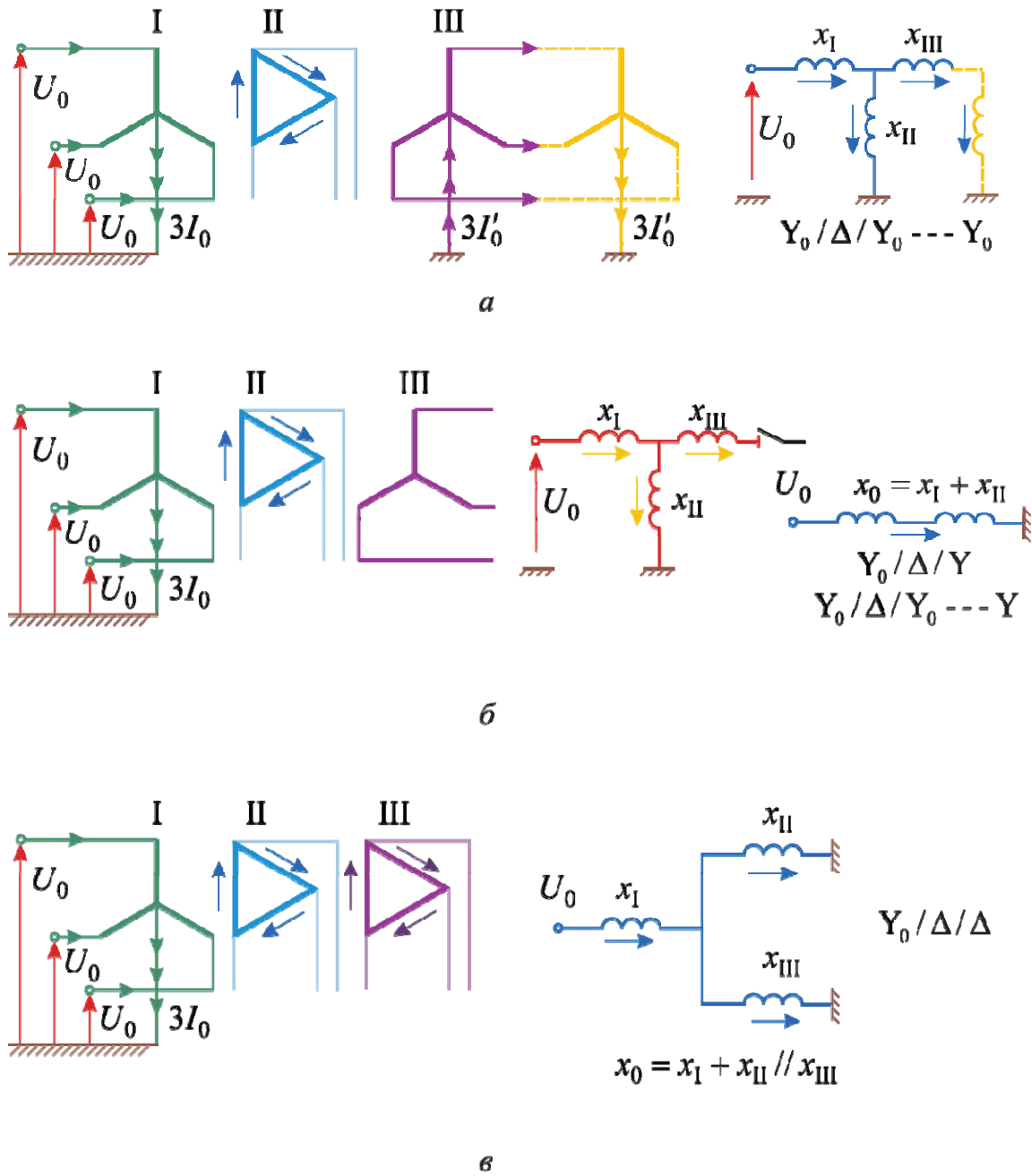


Рис. 6.5. Трехобмоточные трансформаторы. Схемы замещения нулевой последовательности для различных вариантов соединения обмоток

утроенной разности токов нулевой последовательности первичной и вторичной цепей, т. е. $I_N = 3(I_{0I} - I_{0II})$, причем каждый из них должен быть приведен к своей ступени напряжения, а не к какой-либо одной, для которой составлена схема замещения.

Особый случай представляет схема замещения автотрансформатора с заземленной нейтралью через реактивность x_N (см. рис. 6.6, б).

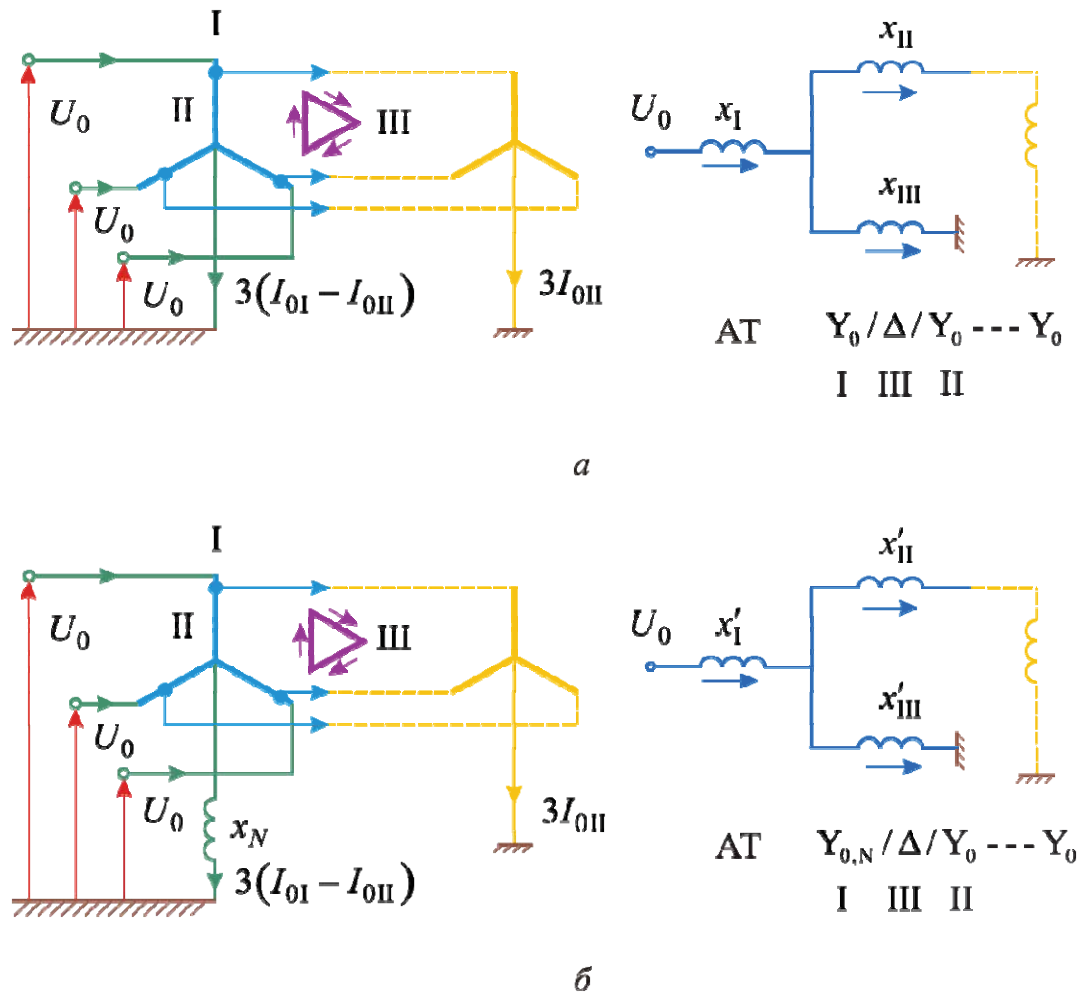


Рис. 6.6. Автотрансформаторы. Схемы замещения нулевой последовательности для разных вариантов соединения обмоток

Реактивности схемы замещения определяются по выражениям [1]:

$$\left. \begin{aligned} x'_I &= x_I + 3x_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right); \\ x'_{II} &= x_{II} + 3x_N \frac{(U_I - U_{II})U_I}{U_{II}^2}; \\ x'_{III} &= x_{III} + 3x_N \frac{U_I}{U_{II}}, \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

где реактивность x_N в относительных или именованных единицах приведена к базисному напряжению ступени I. У автотрансформатора без третьей обмотки раземление нейтрали приводит к тому, что в схеме нулевой последовательности он оказывается в режиме холостого хода. Его реактивность $x_0 = \infty$.

6.2.4. Воздушные и кабельные линии

Реактивное сопротивление нулевой последовательности x_0 воздушных линий (ВЛ) существенно отличается от сопротивления прямой последовательности за счет иного проявления взаимоиндукции. Токи нулевой последовательности, протекая по ВЛ, замыкаются на землю через заземленные нейтралы трансформаторов. В качестве обратного провода служит земля и грозозащитные тросы (рис. 6.7, б).

Основная трудность вычисления реактивности x_0 связана с учетом распределенного характера протекания тока в земле. Ближайший к поверхности слой бывает менее проводящим, чем более глубокий водоносный слой. В этих условиях большая часть тока нулевой последовательности возвращается по глубинным слоям; по мере приближения к поверхности плотность тока увеличивается. Действительную картину распределения тока в земле заменяют эквивалентной, в которой считают, что весь ток возвращается по единичной трубке, расположенной от поверхности земли на глубине D_3 . Для моделирования этих условий трехфазная линия представляется тремя двухпроводными линиями «провод–земля».

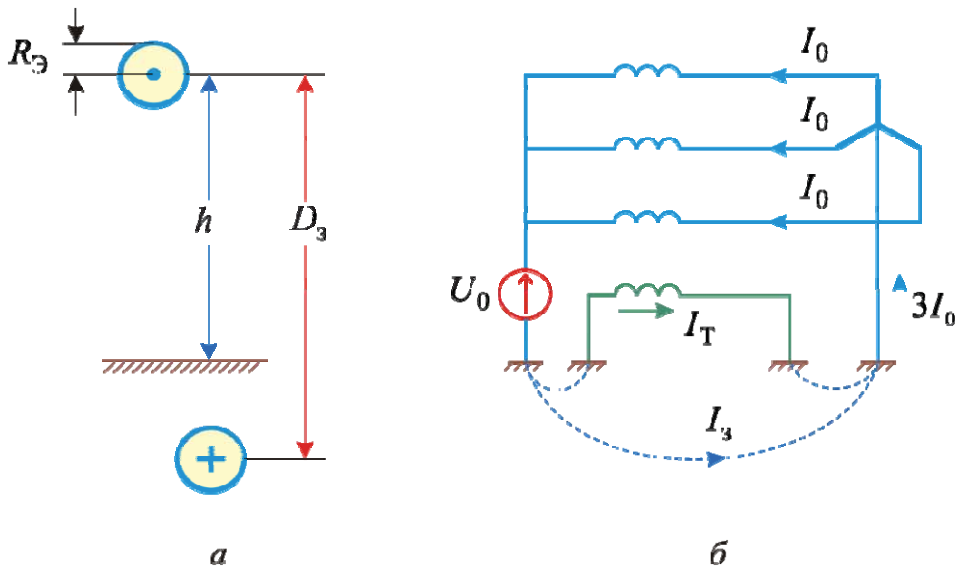


Рис. 6.7. К определению x_0 ВЛ: а – однопроводная линия «провод–земля»; б – пути протекания тока I_0 одноцепной ВЛ с тросом

Учитывая, что D_3 существенно больше высоты подвеса проводов (h), расстояние между прямым и обратным проводом таких линий принимается равным D_3 и определяется формулой Карсона (рис. 6.7, а):

$$D_3 = 2,085 \cdot 10^{-3} / \sqrt{f \lambda 10^{-9}} \quad (\text{м}), \quad (6.17)$$

где f – частота тока, Гц; λ – удельная проводимость земли $(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$.

При $f = 50$ Гц и среднем значении $\lambda = 10^{-4} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ эквивалентная глубина возврата тока через землю $D_3 = 935$ м. В практических расчетах величину D_3 принимают равной 1000 м.

Возьмем участок воздушной линии электропередачи и заземлим один из ее концов. Потенциал заземленного конца будет равен нулю. Пропустим через этот участок симметричную систему токов нулевой последовательности

$$\mathbf{I}_{a0} = \mathbf{I}_{b0} = \mathbf{I}_{c0} = \mathbf{I}_0.$$

Тогда отношение напряжения нулевой последовательности незаземленного конца к фазному току \mathbf{I}_0 дает выражение при $r_0 = 0$:

$$x_0 = \frac{\mathbf{U}_0}{\mathbf{I}_0} = (x_L + x_M + x_M) = (x_L + 2x_M), \quad (6.18)$$

где x_L , x_M – реактивные сопротивления собственной и взаимной индукции.

При тех же условиях, пропуская симметричную систему токов прямой последовательности,

$$\mathbf{I}_{a1}, \mathbf{I}_{b1} = a^2 \mathbf{I}_{a1}, \mathbf{I}_{c1} = a \mathbf{I}_{a1}.$$

Отношение фазного напряжения прямой последовательности незаземленного конца ВЛ (\mathbf{U}_{a1}) к току \mathbf{I}_{a1} дает выражение для реактанса:

$$x_1 = \frac{\mathbf{U}_{a1}}{\mathbf{I}_{a1}} = (x_L + a^2 x_M + a x_M) = (x_L - x_M). \quad (6.19)$$

Сравнение структурных выражений (6.18) и (6.19) показывает, что x_0 на $3x_M$ больше x_1 . Это обусловлено различием характера токов: токи нулевой последовательности совпадают по фазам; токи прямой последовательности имеют сдвиг в 120° .

Для аналитического расчета x_0 одноцепной ВЛ без троса можно пользоваться выражением:

$$x_0 = 0,4351g \frac{D_3}{R_{\text{ср}}}, \quad (6.20)$$

где $R_{\text{ср}} = \sqrt[3]{R_3 D_{\text{ср}}^2}$ – средний геометрический радиус системы трех проводов; $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{d_{AB} d_{AC} d_{BC}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазными проводами; R_3 – эквивалентный радиус провода.

При наличии на линии глухозаземленных грозозащитных тросов сопротивление x_0 уменьшается за счет взаимоиндукции петли трос-провод. С учетом того, что токи в тросе и линии имеют встречное направление, т. е. сдвинуты относительно друг друга на 180° (рис. 6.7, б), получаем

$$x_0^T = x_0 - \frac{x_{0ПТ}^2}{x_{0Т}}, \quad (6.21)$$

где x_0^T – сопротивление нулевой последовательности ВЛ с тросом; $x_{0ПТ}$, $x_{0Т}$ – сопротивления взаимоиндукции провод-трос и собственно троса в нулевой последовательности.

Степень влияния троса зависит от его проводимости (стальной, алюминиевый).

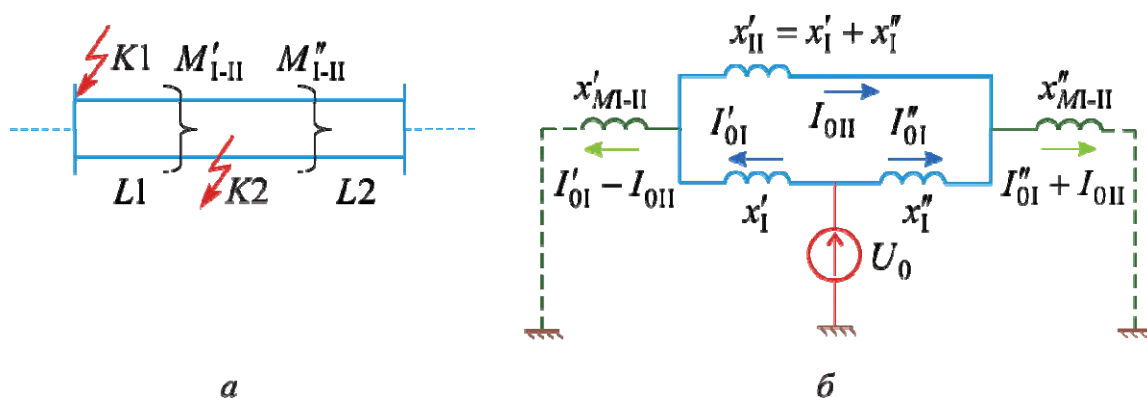


Рис. 6.8. Двухцепная ВЛ: а – принципиальная схема; б – схема замещения нулевой последовательности при КЗ в точке К2

Обратимся к двухцепной ВЛ (рис. 6.8). При коротком замыкании в точке $K1$ токи нулевой последовательности в обеих цепях текут согласно. В этих условиях сопротивление нулевой последовательности каждой цепи дополнительно увеличивается благодаря взаимоиндукции с проводами параллельной цепи, т. е.

$$x'_0 = x_0 + x_{MI-II}, \quad (6.22)$$

и результирующее сопротивление двухцепной ВЛ при идентичности параллельных цепей

$$x''_0 = 0,5x'_0, \quad (6.23)$$

где x_0 – сопротивление нулевой последовательности одноцепной ВЛ; x_{MI-II} – сопротивление взаимоиндукции одной фазы цепи I и трех фаз цепи II.

При коротком замыкании в точке $K2$ двухцепной ВЛ токи нулевой последовательности цепей I и II в одном плече имеют согласное направление, а в другом – встречное, что не позволяет непосредственно воспользоваться выражениями, подобными (6.22). В этих условиях необходимо воспользоваться известной схемой замещения двух магнитно связанных цепей (см. рис. 6.8, б), на которой приняты следующие обозначения:

$$x'_1 = x'_{0I} - x'_{MI-II}, \quad x''_1 = x''_{0I} - x''_{MI-II}, \quad (6.24)$$

где x'_{0I} , x''_{0I} – сопротивления нулевой последовательности одноцепной ВЛ на участках $L1$ и $L2$; x'_{MI-II} , x''_{MI-II} – сопротивления взаимоиндукции цепей на участках $L1$ и $L2$.

Аналитические выражения для расчета x_0 воздушных линий с учетом конструктивных особенностей приведены в [1].

В упрощенных практических вычислениях сопротивление нулевой последовательности (x_0) воздушных линий электропередач допускается определять через коэффициент $k = x_0 / x_1$, значение которого зависит от конструктивного исполнения ВЛ. Приближенные значения коэффициентов приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Исполнение воздушной линии электропередачи	$k = x_0 / x_1$
Одноцепная линия без троса	3,5
Одноцепная линия со стальным тросом	3,0
Одноцепная линия с хорошо проводящим тросом	2,0
Двухцепная линия без троса	5,5
Двухцепная линия со стальным тросом	4,7
Двухцепная линия с хорошо проводящим тросом	3,0

Активное сопротивление нулевой последовательности линии складывается из активного сопротивления провода r_{II} и дополнительного сопротивления r_3 , учитывающего потери активной мощности в земле от протекания в ней тока, т. е.

$$r_0 = r_{II} + r_3, \quad (6.25)$$

где $r_3 \approx 0,15$ Ом/км.

Условия определения реактивного сопротивления нулевой последовательности для кабельных линий аналогичны ВЛ. Часть токов нулевой последовательности возвращается по оболочке кабеля, а часть – по земле. Оболочка кабеля оказывает такое же влияние, как и трос в воздушных линиях, т. е. уменьшает реактанс нулевой последовательности.

В зависимости от конструкции, материала оболочки, способа прокладки x_0 кабельных линий находится в пределах:

$$x_0 = (3,5 \dots 4,6)x_1 \text{ и } r_0 \approx 10r_1. \quad (6.26)$$

На эти значения можно ориентироваться в приближенных расчетах; более точные данные можно получить только на основе натуральных измерений, которые можно найти в специализированной литературе.

6.3. Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей

Неотъемлемым этапом расчета любого несимметричного режима является составление схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Преобразованием этих схем находят результирующие сопротивления всех последовательностей ($x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$); из схемы прямой последовательности дополнительно определяют эквивалентную ЭДС ($E_{1\Sigma}$). Эти преобразования осуществляют относительно *клемм несимметрии, т. е. начала и конца схем*. При поперечной несимметрии началом схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей являются точки (H_1, H_2, H_0), в которых объединены ветви с нулевым потенциалом. Концом схемы любой последовательности являются точки (K_1, K_2, K_0) возникновения несимметрии. При продольной несимметрии начало и конец схемы каждой последовательности – это две точки схемы, между которыми расположен источник несимметрии.

Для примера на рис. 6.9 представлены схемы замещения всех трех последовательностей при несимметричном замыкании в точке K .

Схема прямой последовательности совершенно аналогична схеме при трехфазном замыкании с тем отличием, что в точке K приложено напряжение U_{K1} . Обмотка 3 трансформатора Т2 в схему не входит, поскольку она находится на холостом ходу. В силу симметрии режима ток в нейтрали трансформатора Т1 не протекает и, следовательно, реактор Р в схеме замещения отсутствует.

Схема обратной последовательности по конфигурации повторяет схему прямой последовательности. Ее особенность состоит в том, что отсутствуют ЭДС генерирующих источников; в точке $K3$ приложено напряжение обратной последовательности (U_{K2}), и сопротивления синхронных машин отличны от сопротивлений прямой последовательности.

Схема нулевой последовательности существенно отличается от схемы прямой последовательности в силу различных путей циркуляции токов. Конфигурация схемы нулевой последовательности определяется в основном схемой соединения обмоток трансформаторов и их местом

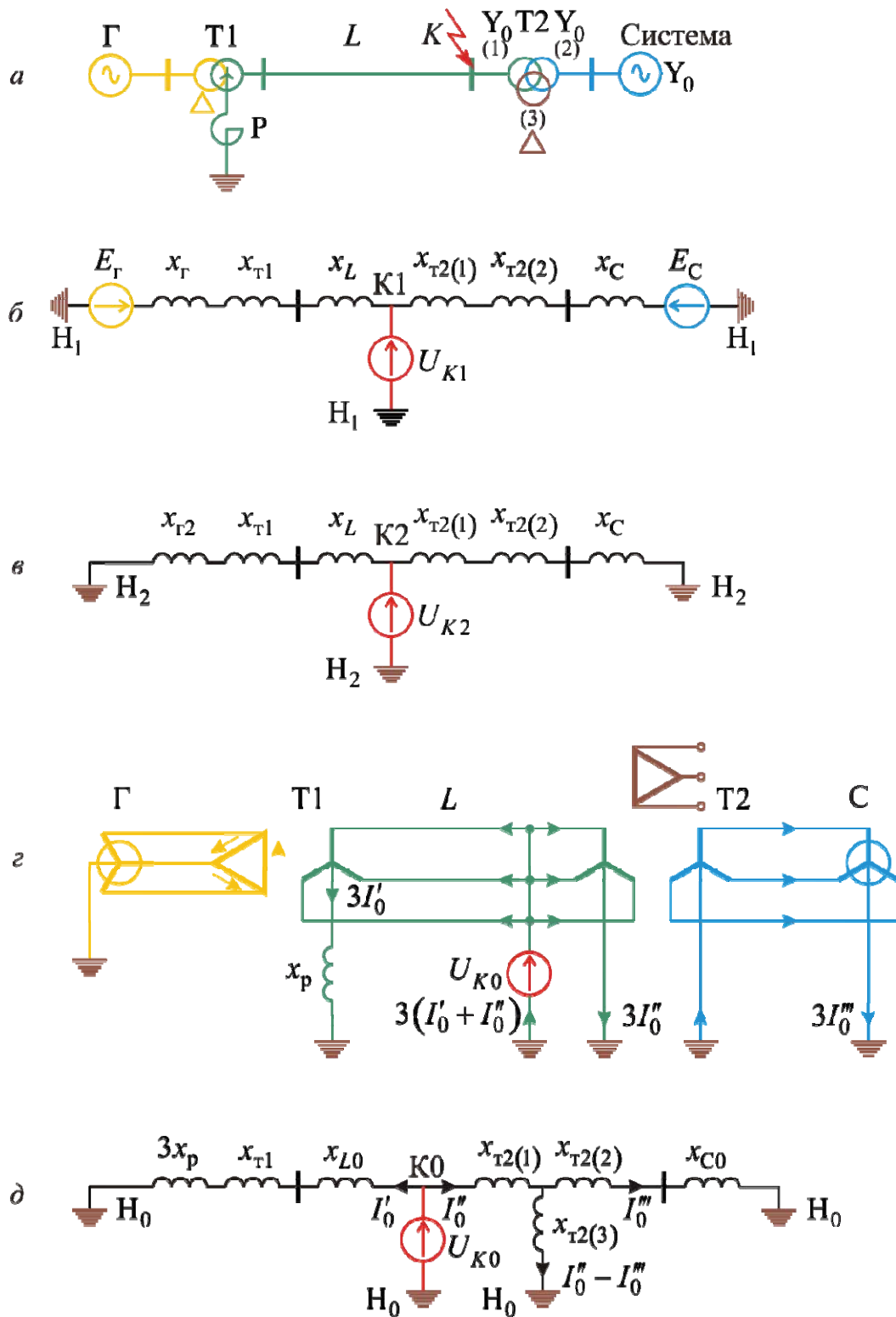


Рис. 6.9. Схемы замещения различных последовательностей:
 а – принципиальная схема; б, в – схемы прямой и обратной последовательностей; г, д – трехлинейная и однолинейная схемы нулевой последовательности

расположения. Составление схемы следует начинать от места короткого замыкания, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой, и к ней приложено напряжение нулевой последовательности (U_{K0}). Далее следует выявить возможные пути протекания токов нулевой последовательности. Это возможно, если в цепи, электрически связанной с точкой КЗ, имеется по меньшей мере одна заземленная нейтраль. Если таких нейтралей несколько, то образуется несколько замкнутых контуров.

Для рассматриваемой схемы, изображенной на рис. 6.9, з, обмотки трансформаторов Т1 и Т2, соединенные в треугольник (Δ), входят в схему нулевой последовательности. Потенциал за этими обмотками равен нулю. По этой причине генератор Г в схеме отсутствует. Все остальные элементы входят в схему, включая и реактор в нейтрали Т1.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, вводится в схему утроенной величиной и располагается последовательно с сопротивлением той обмотки, в нейтрали которой оно находится. Это обусловлено тем, что в нейтрали протекает утроенный ток, и падение напряжения нулевой последовательности на сопротивлении реактора составляет $3I'_0x_p$. Оно должно быть обеспечено и в однолинейной схеме замещения, по которой протекает фазный ток. Это достигается утроением сопротивления нейтрали, так что падение напряжения при этом остается неизменным, т. е. I'_03x_p . Сопротивление нулевой последовательности линии существенно отличается от сопротивления прямой, поэтому оно введено значением x_{L0} .

Как отмечалось ранее, из схем замещения отдельных последовательностей определяются их эквивалентные параметры относительно клемм несимметрии. Применительно к схемам замещения, изображенным на рис. 6.9, имеем эквивалентные схемы 1, 2, 0 последовательностей (см. рис. 6.10). Параметры этих схем определяются так:

- для схемы прямой последовательности:

$$x_{A1} = x_{\Gamma} + x_{T1} + x_L, \quad x_{B1} = x_{T2(1)} + x_{T2(2)} + x_C;$$

$$x_{1\Sigma} = x_{A1} // x_{B1}, \quad E_{1\Sigma} = \frac{E_{\Gamma}x_{B1} + E_Cx_{A1}}{x_{A1} + x_{B1}};$$

- для схемы обратной последовательности:

$$x_{A2} = x_{\Gamma 2} + x_{T1} + x_L, \quad x_{B2} = x_{T2(1)} + x_{T2(2)} + x_C, \quad x_{2\Sigma} = x_{A2} // x_{B2};$$

- для схемы нулевой последовательности:

$$x_{A0} = 3x_p + x_{T1} + x_{L0}, \quad x_{B0} = \left[x_{T2(3)} // (x_{T2(2)} + x_{C0}) \right] + x_{T2(1)};$$

$$x_{0\Sigma} = x_{A0} // x_{B0}.$$

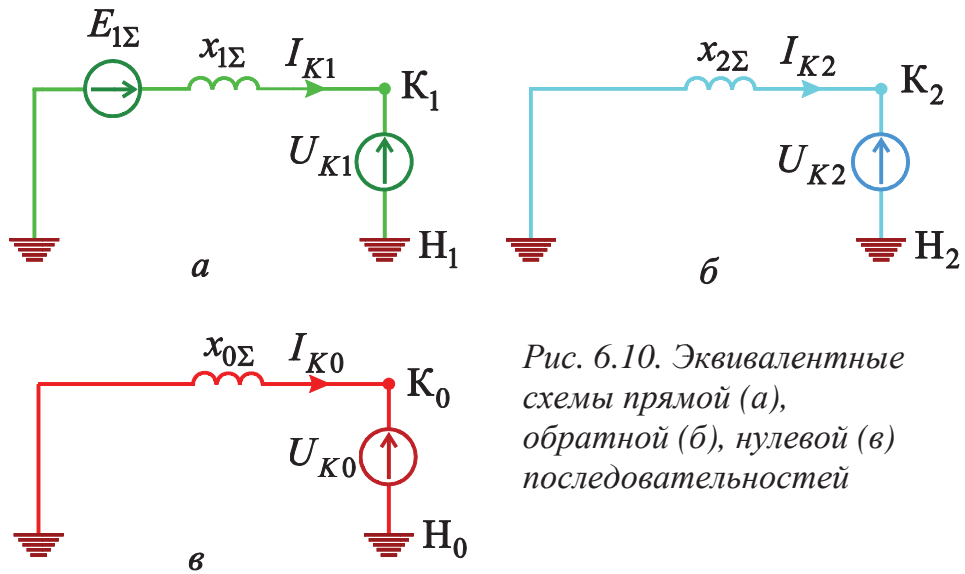


Рис. 6.10. Эквивалентные схемы прямой (а), обратной (б), нулевой (в) последовательностей

На рис. 6.11, а приведена схема, в которой элементы обозначены порядковыми номерами, на рис. 6.11, б – соответствующая ей схема замещения нулевой последовательности. Обмотки трансформаторов со стороны генераторов соединены в «треугольник». Это препятствует

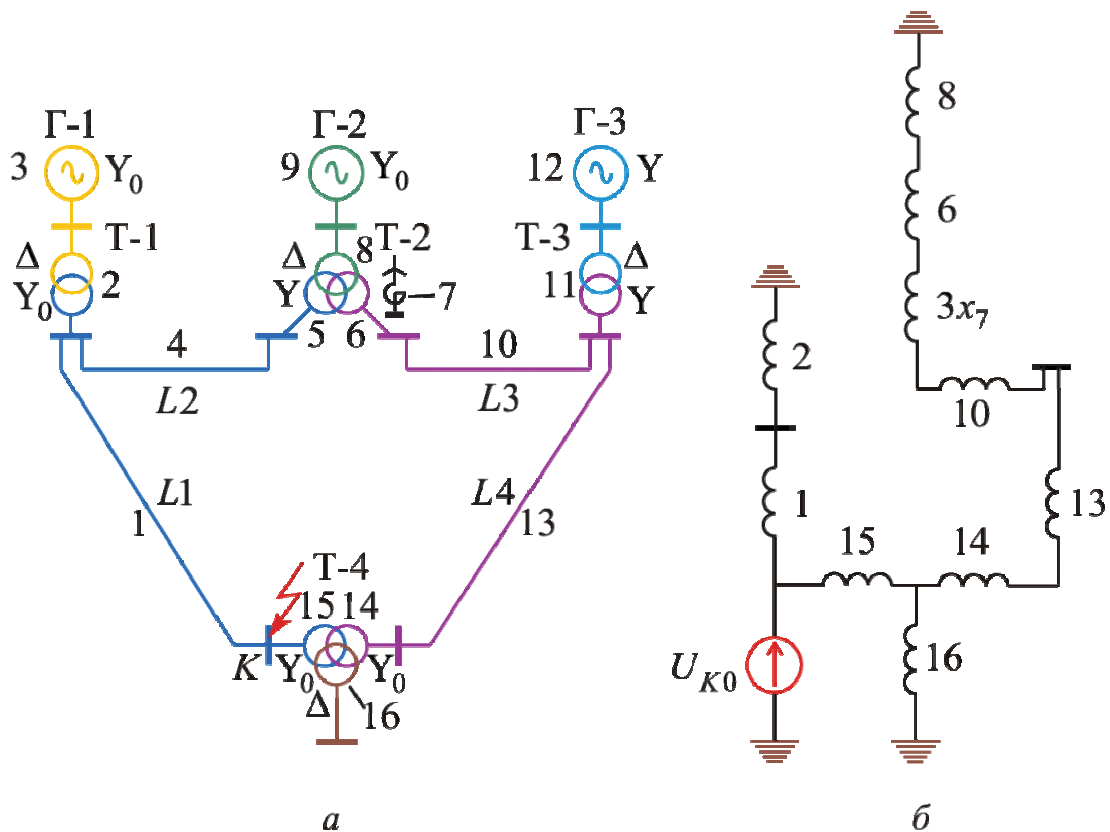


Рис. 6.11. Пример схемы нулевой последовательности: а – принципиальная схема; б – схема замещения нулевой последовательности

прохождению токов нулевой последовательности в генераторах при внешних коротких замыканиях. Обмотка 5 (Y) трансформатора T2 со стороны узла возникновения короткого замыкания не пропускает токов нулевой последовательности, поэтому она и последовательная ей ветвь воздушной линии L2 в схеме отсутствуют. Это в равной степени относится и к трансформатору T3. Реактор 7 в нейтрали обмотки 6 трансформатора T2 входит в схему утроенным реактансом и располагается последовательно с сопротивлением этой обмотки 6. Трансформатор T4 входит в схему всеми тремя обмотками.

Контрольные вопросы

1. В чем достоинства и недостатки метода симметричных составляющих при его применении к расчетам несимметричных режимов в электрических системах?
2. Каковы особенности расчета сопротивлений обратной и нулевой последовательностей для силовых элементов энергосистемы?
3. От каких факторов зависит схема замещения и реактивное сопротивление нулевой последовательности (x_0) трансформаторов?
4. Для каких трансформаторов с соединением Y_0/Y в схеме нулевой последовательности при расчете x_0 необходимо учитывать $x_{\mu 0}$ как конечную величину?
5. Почему в схеме нулевой последовательности трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ за обмоткой Δ имеет место нулевой потенциал?
6. Чем обусловлено различие x_0 и x_1 воздушных линий?
7. В чем проявляется влияние заземленных тросов воздушных линий электропередач на x_0 ?
8. При каких условиях справедлив принцип независимости действия симметричных составляющих; в чем его сущность и практическая применимость?
9. В чем отличие схем замещения обратной и нулевой последовательностей от прямой последовательности?
10. Что является источником токов обратной и нулевой последовательностей?
11. Какие узлы являются началом и концом схем замещения различных последовательностей при поперечной несимметрии?
12. В чем особенность учета сопротивления в нейтрали трансформатора в схеме нулевой последовательности?

Глава 7

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ

7.1. Общие замечания

В данной главе рассматриваются три основных вида несимметричных коротких замыканий (двухфазное, однофазное и двухфазное на землю). С целью упрощения расчетных выражений считаем КЗ металлическим (отсутствует переходное сопротивление) и пренебрегаем активным сопротивлением силовых элементов. Учет этих факторов рассмотрен в [11, С. 472].

Как уже отмечалось, для нахождения токов и напряжений по месту несимметричного короткого замыкания необходимо воспользоваться уравнениями (6.11, 6.12, 6.13), которые следует дополнить тремя уравнениями граничных условий. Наиболее просто и наглядно граничные условия для любого несимметричного КЗ записываются в том случае, если предположить, что короткое замыкание происходит не в действительной точке заданной схемы, а на некоторых сверхпроводящих ответвлениях, подключенных по месту повреждения. Токи в этих ответвлениях являются действительными токами по месту КЗ. За положительное направление токов будем считать направление к месту КЗ.

При записи граничных выражений принимается, что фаза A находится в условиях, отличных от условий для двух других фаз (B и C), т. е. она является *особой фазой*.

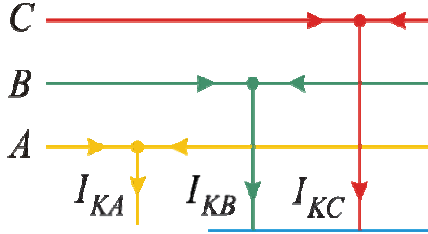
При выводе расчетных выражений считается, что отдельные последовательности представлены их эквивалентными схемами (см. рис. 6.2; 6.10), и найдены результирующая ЭДС (E_{Σ}) и результирующие реактивности ($x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$). Чтобы упростить запись, будем опускать индекс вида короткого замыкания, сохраняя его только в записи граничных условий.

Алгоритмически решение поставленной задачи предполагает в первую очередь нахождение симметричных составляющих токов и напряжений. Это позволяет на базе уравнений, аналогичных (6.2–6.4), определить несимметричные фазные величины токов и напряжений по месту КЗ. Приводимая далее последовательность решения системы уравнений является одной из возможных.

Второй путь решения задачи может быть основан на использовании так называемых комплексных схем замещения. Если априори считать, что они известны, то расчет симметричных составляющих токов и напряжений существенно упрощается.

7.2. Двухфазное короткое замыкание

При коротком замыкании $K^{(2)}$ между фазами B и C (рис.7.1) имеем граничные условия:



$$\mathbf{I}_{KA}^{(2)} = 0; \quad (7.1)$$

$$\mathbf{I}_{KB}^{(2)} = -\mathbf{I}_{KC}^{(2)}; \quad (7.2)$$

$$\mathbf{U}_{KB}^{(2)} - \mathbf{U}_{KC}^{(2)} = 0. \quad (7.3)$$

Рис. 7.1. Токи в месте двухфазного КЗ

Отсутствие связи с землей дает дополнительные условия:

$$\mathbf{U}_{K0} = 0, \quad \mathbf{I}_{K0} = 0.$$

Граничное условие (7.1) через симметричные составляющие записывается так:

$$\mathbf{I}_{KA} = \mathbf{I}_{Ka1} + \mathbf{I}_{Ka2} = 0,$$

откуда

$$\mathbf{I}_{Ka1} = -\mathbf{I}_{Ka2}. \quad (7.4)$$

Выразим фазные напряжения в граничном условии (7.3) через симметричные составляющие фазы A :

$$a^2 \mathbf{U}_{Ka1} + a \mathbf{U}_{Ka2} - (a \mathbf{U}_{Ka1} + a^2 \mathbf{U}_{Ka2}) = (a^2 - a)(\mathbf{U}_{Ka1} - \mathbf{U}_{Ka2}) = 0.$$

Следствием этого тождества, с учетом того, что $(a^2 - a) \neq 0$, является равенство симметричных составляющих напряжения прямой и обратной последовательностей

$$\mathbf{U}_{Ka1} = \mathbf{U}_{Ka2}. \quad (7.5)$$

Это соотношение позволяет приравнять правые части выражений (6.11) и (6.12), т. е.

$$\mathbf{E}_{\Sigma} - \mathbf{I}_{Ka1} j x_{1\Sigma} = -\mathbf{I}_{Ka2} j x_{2\Sigma}.$$

Заменяя в этом выражении ток обратной последовательности током прямой согласно соотношению (7.4), получаем формулу для расчета тока прямой последовательности особой фазы A :

$$\mathbf{I}_{Ka1} = \frac{\mathbf{E}_{\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}. \quad (7.6)$$

Токи поврежденных фаз B и C в месте КЗ вычисляются на основе выражений (6.3) и (6.4) через ток \mathbf{I}_{Ka1} :

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_{KB} &= a^2 \mathbf{I}_{Ka1} + a \mathbf{I}_{Ka2} = (a^2 - a) \mathbf{I}_{Ka1} = -j\sqrt{3} \mathbf{I}_{Ka1}; \\ \mathbf{I}_{KC} &= -\mathbf{I}_{KB} = j\sqrt{3} \mathbf{I}_{Ka1}.\end{aligned}\quad (7.7)$$

В практических расчетах, принимая $x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma}$, модуль тока при $K^{(2)}$ можно выразить через ток трехфазного короткого замыкания в этой же точке:

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E_\Sigma}{2x_{1\Sigma}} \approx 0,87I_K^{(3)}.$$

Заменяя в выражении (6.12) ток обратной последовательности током прямой последовательности согласно (7.4), находим симметричные составляющие напряжений \mathbf{U}_{Ka2} и \mathbf{U}_{Ka1} :

$$\mathbf{U}_{Ka1} = \mathbf{I}_{Ka1} jx_{2\Sigma} = \mathbf{U}_{Ka2} \quad (7.8)$$

и фазные напряжения в месте короткого замыкания:

$$\mathbf{U}_{KA} = \mathbf{U}_{Ka1} + \mathbf{U}_{Ka2} = 2\mathbf{U}_{Ka1} = 2\mathbf{I}_{Ka1} jx_{2\Sigma}; \quad (7.9)$$

$$\mathbf{U}_{KB} = \mathbf{U}_{KC} = a^2 \mathbf{U}_{Ka1} + a \mathbf{U}_{Ka2} = -\mathbf{U}_{Ka1} = -\frac{\mathbf{U}_{KA}}{2}. \quad (7.10)$$

Как отмечалось, ряд приведенных выше соотношений можно получить на основе комплексной схемы замещения для двухфазного КЗ (см. разд. 7.7, рис. 7.8, a). Непосредственно из этой схемы следует: напряжение прямой и обратной последовательностей одинаковы, что соответствует выражению (7.5); ток прямой и обратной последовательностей равен по величине и противоположен по знаку [см. соотношение (7.4)]. Непосредственно из контура прямая–обратная последовательность определяется ток \mathbf{I}_{Ka1} ; этому соответствует формула (7.6). Напряжение \mathbf{U}_{Ka2} равно падению напряжения от тока \mathbf{I}_{Ka1} на реактансе $x_{2\Sigma}$ [см. (7.9)].

Полученные соотношения для симметричных составляющих токов (7.4) и напряжений (7.5) позволяют построить векторные диаграммы по месту короткого замыкания (см. рис. 7.2).

Построение диаграммы токов (см. рис. 7.2, a). Принимая вектор ЭДС мнимым ($\mathbf{E}_\Sigma = jE_\Sigma$), согласно выражению (7.6), получаем вектор тока \mathbf{I}_{Ka1} величиной вещественной. По оси (+1) откладываем в масшта-

бе вектор \mathbf{I}_{Ka1} и строим вектор \mathbf{I}_{Kb1} со сдвигом -120° , вектор \mathbf{I}_{Kc1} – со сдвигом 120° .

С построенной системой токов прямой последовательности согласуем систему токов обратной последовательности. Из соотношения (7.4) вектор \mathbf{I}_{Ka2} по модулю равен току \mathbf{I}_{Ka1} и сдвинут на 180° , что позволяет вектор \mathbf{I}_{Ka2} согласовать с \mathbf{I}_{Ka1} . Симметричные составляющие \mathbf{I}_{Kb2} и \mathbf{I}_{Kc2} по известному правилу ориентируются относительно вектора \mathbf{I}_{Ka2} . Геометрическая сумма симметричных составляющих одноименной фазы дает результирующий вектор тока. Ток фазы А равен нулю; для получения тока \mathbf{I}_{KB} вектор \mathbf{I}_{Kb1} складываем с вектором \mathbf{I}_{Kb2} (показан пунктиром).

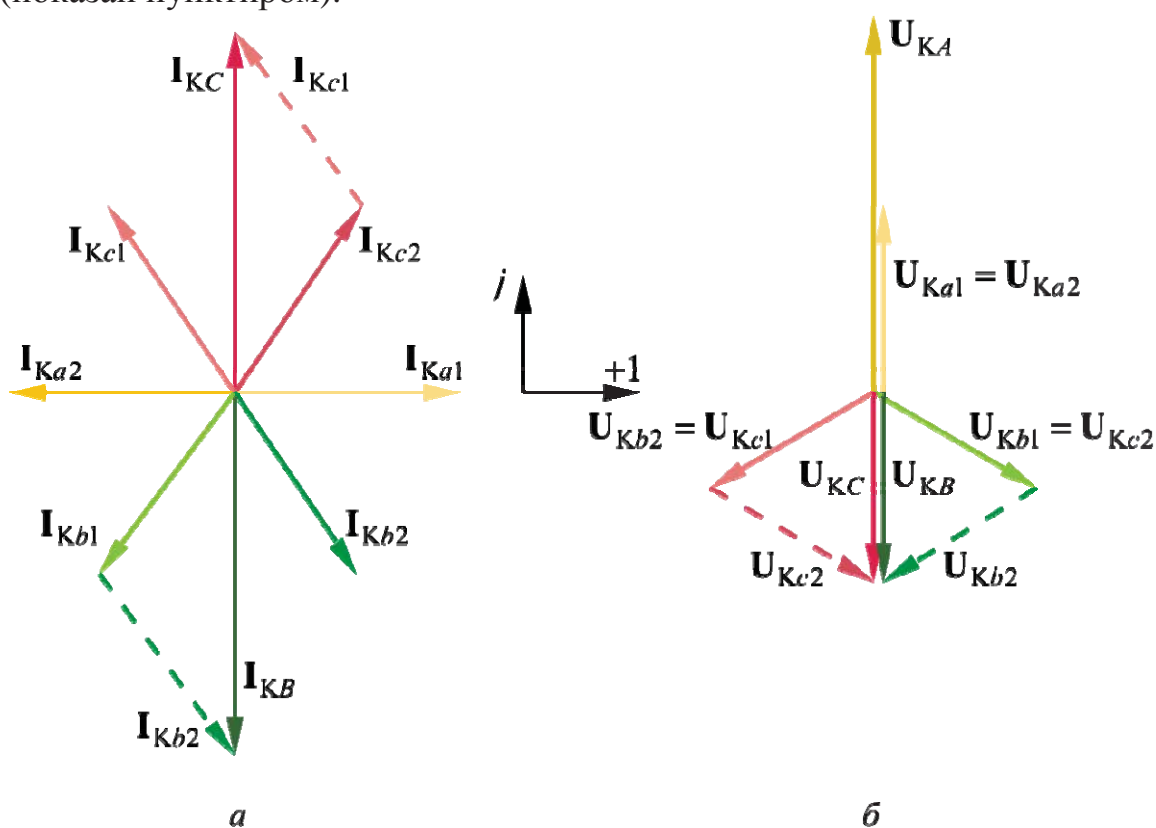


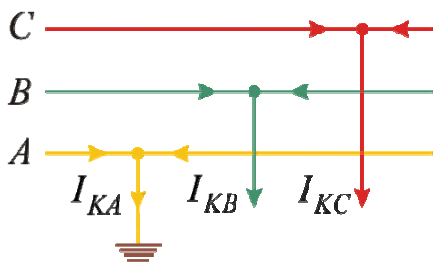
Рис. 7.2. Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) в месте двухфазного КЗ

Аналогично строится диаграмма напряжений, которая по своему расположению согласуется с токовой. Это согласование определяется соотношением (7.8), из которого следует, что вектор \mathbf{U}_{Ka1} опережает вектор \mathbf{I}_{Ka1} на 90° , т. е. вектор \mathbf{U}_{Ka1} располагается в положительном направлении по мнимой оси. Дополняя прямую последовательность векторами \mathbf{U}_{Kb1} и \mathbf{U}_{Kc1} , переходим к построению обратной последова-

тельности. Вектор $U_{Ka2} = U_{Ka1}$; это соотношение позволяет сориентировать вектор напряжения обратной последовательности особой фазы A по отношению к вектору напряжения прямой последовательности. Суммируя симметричные составляющие напряжений одноименной фазы, получаем несимметричную систему напряжений U_{KA}, U_{KB}, U_{KC} по месту короткого замыкания.

7.3. Однофазное короткое замыкание

При замыкании особой фазы A на землю (рис. 7.3), что соответствует $K^{(1)}$, граничные условия имеют вид:



$$U_{KA}^{(1)} = 0, \quad (7.11)$$

$$I_{KB}^{(1)} = 0, \quad (7.12)$$

$$I_{KC}^{(1)} = 0. \quad (7.13)$$

Рис. 7.3. Токи в месте однофазного КЗ на землю

Нетрудно убедиться, что при выполнении условий (7.12) и (7.13) симметричные составляющие токов в месте КЗ, согласно формулам (6.5)–(6.7), связаны простым соотношением:

$$I_{Ka1} = I_{Ka2} = I_{K0} = \frac{1}{3} I_{KA}. \quad (7.14)$$

Для напряжения фазы A , в соответствии с (7.11), можно записать:

$$U_{KA} = U_{Ka1} + U_{Ka2} + U_{K0} = 0. \quad (7.15)$$

Заменяя в уравнении (7.15) симметричные составляющие напряжений их выражениями из (6.11)–(6.13) и учитывая взаимосвязь симметричных составляющих токов, согласно (7.14), получим уравнение:

$$E_{\Sigma} - j I_{Ka1} (x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) = 0,$$

что позволяет записать расчетное выражение для тока прямой последовательности особой фазы A :

$$I_{Ka1} = \frac{E_{\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}. \quad (7.16)$$

Зная \mathbf{I}_{Ka1} , можно рассчитать полный ток поврежденной фазы A в месте КЗ, используя условие (7.14):

$$\mathbf{I}_{KA} = 3\mathbf{I}_{Ka1}; \quad (7.17)$$

он же является током, протекающим в земле, т. е.

$$\mathbf{I}_3 = 3\mathbf{I}_{K0} = \mathbf{I}_{KA}.$$

Симметричные составляющие напряжений \mathbf{U}_{K0} , \mathbf{U}_{Ka2} на основе выражений (6.13), (6.12) и \mathbf{U}_{Ka1} на основе условия (7.15) вычисляются по следующим формулам:

$$\mathbf{U}_{K0} = -\mathbf{I}_{K0}jx_{0\Sigma} = -\mathbf{I}_{Ka1}jx_{0\Sigma}; \quad (7.18)$$

$$\mathbf{U}_{Ka2} = -\mathbf{I}_{Ka2}jx_{2\Sigma} = -\mathbf{I}_{Ka1}jx_{2\Sigma}; \quad (7.19)$$

$$\mathbf{U}_{Ka1} = -(\mathbf{U}_{Ka2} + \mathbf{U}_{K0}) = \mathbf{I}_{Ka1}j(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}). \quad (7.20)$$

Соотношение (7.14) позволяет конечные выражения для симметричных составляющих напряжений записать через ток прямой последовательности особой фазы.

Остаточные напряжения неповрежденных фаз B и C в месте КЗ находим на основе симметричных составляющих \mathbf{U}_{Ka1} , \mathbf{U}_{Ka2} , \mathbf{U}_{K0} :

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_{KB} = a^2\mathbf{U}_{Ka1} + a\mathbf{U}_{Ka2} + \mathbf{U}_{K0} = \mathbf{I}_{Ka1}j \left[(a^2 - a)x_{2\Sigma} + (a^2 - 1)x_{0\Sigma} \right]; \\ \mathbf{U}_{KC} = \mathbf{I}_{Ka1}j \left[(a - a^2)x_{2\Sigma} + (a - 1)x_{0\Sigma} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (7.21)$$

В комплексной схеме замещения (см. рис. 7.8, б) схемы 1, 2, 0 соединены последовательно, образуя один контур. Из этой схемы вытекает (7.14): равенство симметричных составляющих токов всех трех последовательностей. Ток \mathbf{I}_{Ka1} представляет результат деления ЭДС \mathbf{E}_Σ на суммарный реактанс контура, что и отражает формула (7.16). Условие (7.15) и выражения для симметричных составляющих напряжений (7.18)–(7.20) также могут быть записаны непосредственно из схем 1, 2, 0 комплексной схемы для $K^{(1)}$.

Используя полученные соотношения между симметричными составляющими токов (7.14) и напряжений (7.18)–(7.20) по месту короткого замыкания, можно построить векторные диаграммы, изображенные на рис. 7.4. Вектора тока и напряжения нулевой последовательности прочерчиваются один раз и в последующем используются при построении векторной диаграммы каждой фазы.

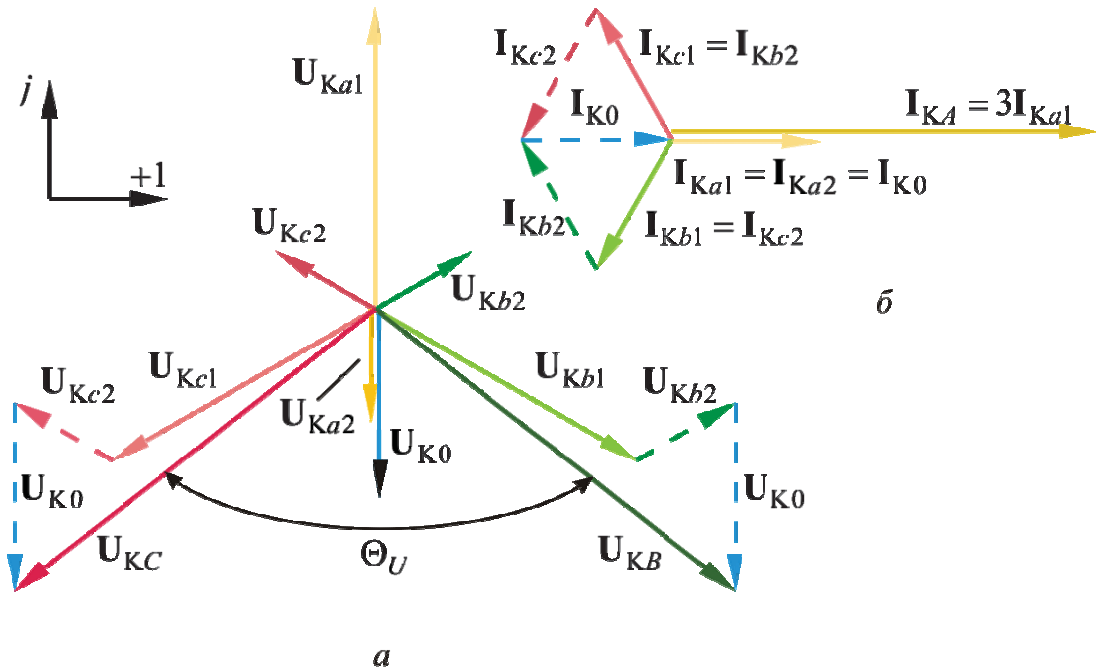
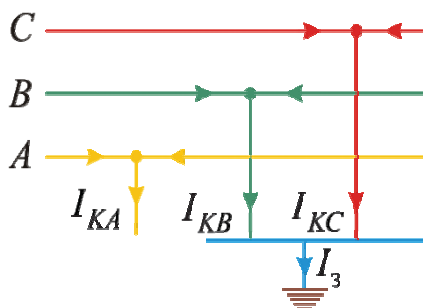


Рис. 7.4. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) в месте однофазного КЗ

Угол Θ_U между напряжениями неповрежденных фаз (B и C) зависит от соотношения между $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$. Он изменяется в широких пределах: $60^\circ \leq \Theta_U \leq 180^\circ$. Нижний предел соответствует условию $x_{0\Sigma} = \infty$; к верхнему пределу угол Θ_U стремится при $x_{0\Sigma} \rightarrow \infty$. В частном случае, когда $x_{2\Sigma} = x_{0\Sigma}$, угол $\Theta_U = 120^\circ$.

7.4. Двухфазное короткое замыкание на землю

При одновременном замыкании фаз B и C на землю в одной точке (рис. 7.5), что соответствует ($K^{(1.1)}$), граничные условия имеют вид:



$$I_{KA}^{(1.1)} = 0, \quad (7.22)$$

$$U_{KB}^{(1.1)} = 0, \quad (7.23)$$

$$U_{KC}^{(1.1)} = 0. \quad (7.24)$$

Рис. 7.5. Токи в месте двухфазного КЗ на землю

Условия (7.23), (7.24) дают простые соотношения между симметричными составляющими напряжений:

$$\mathbf{U}_{Ka1} = \mathbf{U}_{Ka2} = \mathbf{U}_{K0} = \frac{1}{3} \mathbf{U}_{KA}. \quad (7.25)$$

Ток неповрежденной фазы A , согласно граничному условию (7.22), запишем в развернутой форме:

$$\mathbf{I}_{Ka1} + \mathbf{I}_{Ka2} + \mathbf{I}_{K0} = 0. \quad (7.26)$$

Решим уравнения (6.11)–(6.13) относительно симметричных составляющих токов, учитывая, что согласно (7.25) $\mathbf{U}_{Ka1} = \mathbf{U}_{Ka2} = \mathbf{U}_{K0}$:

$$\mathbf{I}_{Ka1} = \frac{\mathbf{E}_\Sigma - \mathbf{U}_{Ka1}}{jx_{1\Sigma}}, \quad \mathbf{I}_{Ka2} = -\frac{\mathbf{U}_{Ka1}}{jx_{2\Sigma}}, \quad \mathbf{I}_{K0} = -\frac{\mathbf{U}_{Ka1}}{jx_{0\Sigma}}. \quad (7.27)$$

Замена в уравнении (7.26) токов \mathbf{I}_{Ka2} и \mathbf{I}_{K0} функциональными зависимостями (7.27) позволяет получить расчетную формулу для симметричных составляющих напряжений:

$$\mathbf{U}_{Ka1} = \mathbf{U}_{Ka2} = \mathbf{U}_{K0} = \mathbf{I}_{Ka1} j \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = \mathbf{I}_{Ka1} j (x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma}). \quad (7.28)$$

Рассчитаем симметричные составляющие токов. Для этого в каждом из выражений (7.27) заменим напряжение \mathbf{U}_{Ka1} функциональной зависимостью (7.28). В результате получим:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_{Ka1} &= \frac{\mathbf{E}_\Sigma}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma})}; \\ \mathbf{I}_{Ka2} &= -\mathbf{I}_{Ka1} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}; \\ \mathbf{I}_{K0} &= -\mathbf{I}_{Ka1} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.29)$$

Токи поврежденных фаз в месте КЗ в конечном итоге определяются через ток прямой последовательности:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_{KB} &= \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{Ka1} + \mathbf{a} \mathbf{I}_{Ka2} + \mathbf{I}_{K0} = \mathbf{I}_{Ka1} \left(\mathbf{a}^2 - \frac{x_{2\Sigma} + \mathbf{a} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right) = m^{(1.1)} \mathbf{I}_{Ka1}; \\ \mathbf{I}_{KC} &= \mathbf{I}_{Ka1} \left(\mathbf{a} - \frac{x_{2\Sigma} + \mathbf{a}^2 x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right) = m^{(1.1)} \mathbf{I}_{Ka1}. \end{aligned} \right\} \quad (7.30)$$

Модули комплексных коэффициентов $m^{(1.1)}$, представляющие собой выражения, заключенные в круглые скобки, одинаковы и записываются так:

$$m^{(1.1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}. \quad (7.31)$$

В зависимости от соотношения между $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ значение коэффициента $m^{(1.1)}$ находится в пределах:

$$1,5 \leq m^{(1.1)} \leq \sqrt{3}.$$

Нижний предел наступает при $x_{2\Sigma} = x_{0\Sigma}$, а верхний – при $x_{2\Sigma} / x_{0\Sigma}$, равном 0 или ∞ .

Полное напряжение неповрежденной фазы в месте короткого замыкания определяется из (7.25) и составляет

$$U_{KA} = 3U_{Ka1}; \quad (7.32)$$

напряжение других фаз (B и C) равно нулю. Ток, протекающий в земле, определяется суммой токов поврежденных фаз, которая равна утроенному току нулевой последовательности:

$$I_3 = (I_{KB} + I_{KC}) = 3I_{K0}.$$

Отметим, что при $x_{0\Sigma} \rightarrow \infty$ двухфазное короткое замыкание на землю $K^{(1.1)}$ переходит в обычное двухфазное замыкание $K^{(2)}$.

С точки зрения получения расчетных выражений двухфазное короткое замыкание на землю ($K^{(1.1)}$) является наиболее сложным видом повреждения. Существенно проще основные соотношения для симметричных составляющих тока и напряжения можно получить из комплексной схемы замещения (см. рис. 7.8, в).

Она представляет параллельное соединение эквивалентных схем прямой, обратной и нулевой последовательностей. При таком соединении симметричные составляющие напряжений одинаковы ($U_{Ka1} = U_{Ka2} = U_{K0}$), что отражено в соотношении (7.25), и определяются выражением (7.28). Ток прямой последовательности (I_{Ka1}) представляет результат деления результирующей ЭДС (E_Σ) на эквивалентный реактанс схемы $x_{1\Sigma} + (x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma})$, что соответствует первому выражению (7.29). Токи I_{Ka2} и I_{K0} находим по формулам распределения

тока I_{Ka1} между двумя параллельными ветвями с реактивностями $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ [см. (7.29)].

Векторные диаграммы токов и напряжений в месте $K^{(1.1)}$ представлены на рис. 7.6. При построении диаграммы напряжений учтено, что, согласно (7.25), симметричные составляющие напряжений равны между собой по величине и фазе.

Для построения векторной диаграммы токов используются соотношения (7.29), из которых следует, что сумма токов обратной и нулевой последовательностей по модулю дает ток прямой последовательности; токи I_{Ka2} и I_{K0} по знаку противоположны току I_{Ka1} .

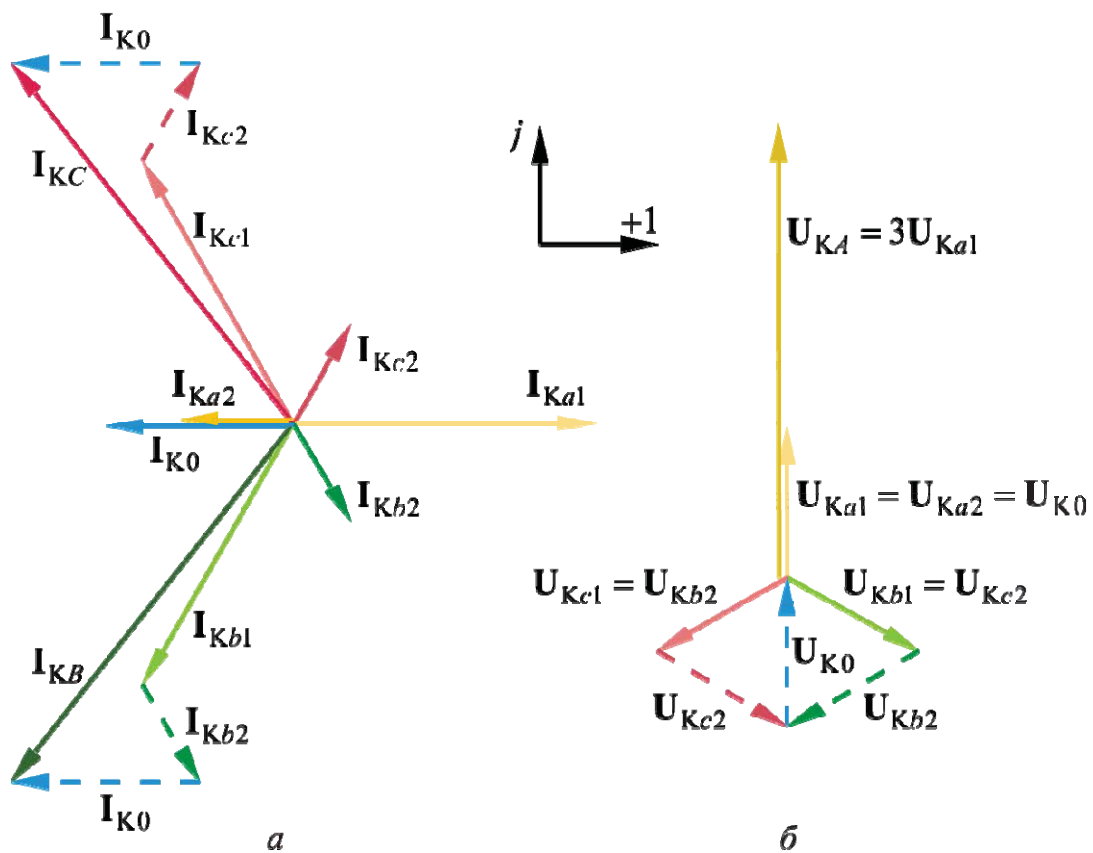


Рис. 7.6. Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) в месте двухфазного КЗ на землю

Отметим, что векторная диаграмма напряжений при $K^{(1.1)}$ по своему виду тождественна векторной диаграмме токов при $K^{(1)}$. Такая же аналогия имеет место между векторной диаграммой токов при $K^{(1.1)}$ и напряжений при $K^{(1)}$.

7.5. Обобщенные выражения для несимметричных коротких замыканий

Анализ расчетных выражений, полученных в трех последних разделах, показывает, что все без исключения параметры, представляющие практический интерес при анализе несимметричных КЗ, выражаются через ток прямой последовательности. При этом многие из этих параметров можно представить в обобщенном виде, справедливом для любого несимметричного короткого замыкания. Поэтому при поперечной несимметрии в первую очередь необходим расчет тока прямой последовательности.

Структура выражений (7.6), (7.16), (7.29) позволяет записать универсальную формулу для расчета тока прямой последовательности при любом (n) виде несимметричного КЗ:

$$\mathbf{I}_{K1}^{(n)} = \frac{\mathbf{E}_{\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)})}, \quad (7.33)$$

где $x_{\Delta}^{(n)}$ – дополнительная реактивность, которая для каждого вида короткого замыкания определяется сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей:

$$x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma}, \quad x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}, \quad x_{\Delta}^{(1.1)} = x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma}.$$

В свою очередь, модуль тока при любом несимметричном коротком замыкании можно вычислить по выражению:

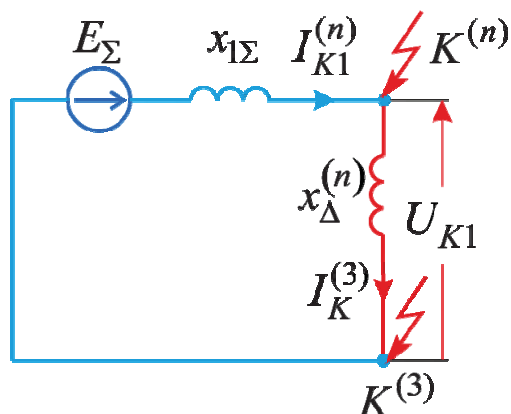
$$\mathbf{I}_K^{(n)} = m^{(n)} \mathbf{I}_{K1}^{(n)}, \quad (7.34)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, характеризующий рассчитываемый вид короткого замыкания, причем

$$m^{(2)} = \sqrt{3}, \quad m^{(1)} = 3, \quad m^{(1.1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}.$$

Обобщенное выражение (7.33) отражает *правило эквивалентности прямой последовательности* (см. рис. 7.7): ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ в точке $K^{(n)}$ численно равен току трехфазного КЗ в фиктивной точке $K^{(3)}$, удаленной от реальной точки несимметричного замыкания на дополнительное сопротивление $x_{\Delta}^{(n)}$, определяемое сопротивлениями обратной ($x_{2\Sigma}$) и нулевой ($x_{0\Sigma}$) последовательностей.

Расчетные выражения для симметричных составляющих напряжений любого несимметричного КЗ имеют универсальную запись:



$$\left. \begin{aligned} U_{K1}^{(n)} &= I_{K1}^{(n)} jx_{\Delta}^{(n)}; \\ U_{K2}^{(n)} &= -I_{K2}^{(n)} jx_{2\Sigma}; \\ U_{K0}^{(n)} &= -I_{K0}^{(n)} jx_{0\Sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (7.35)$$

Рис. 7.7. Иллюстрация правила эквивалентности прямой последовательности

Установленная идентичность между токами прямой последовательности несимметричных КЗ и током при некотором эквивалентном трехфазном замыкании указывает на то, что все полученные ранее выражения

для тока трехфазного КЗ и практические методы его расчета можно распространить на случаи несимметричных КЗ.

7.6. Сравнение токов различных видов короткого замыкания

Из всех рассмотренных видов коротких замыканий расчет токов при трехфазном коротком замыкании является наиболее простым. Из этих соображений практический интерес представляют примерные пределы, в которых могут быть величины токов при несимметричных КЗ по сравнению с величинами токов трехфазного короткого замыкания. В общем виде указанные соотношения могут быть определены на основе выражений (7.33), (7.34):

$$K_{(n-3)} = \frac{I_K^{(n)}}{I_K^{(3)}} = \frac{m^{(n)} E_{\Sigma} x_{1\Sigma}}{(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}) E_{\Sigma}} = \frac{m^{(n)}}{1 + \frac{x_{\Delta}^{(n)}}{x_{1\Sigma}}}. \quad (7.36)$$

Найдем пределы этих отношений для каждого вида несимметричного короткого замыкания.

Для двухфазного КЗ имеем $m = \sqrt{3}$, $x_{\Delta} = x_{2\Sigma}$. Для начального момента короткого замыкания в любой точке реактансы прямой и обратной последовательностей практически одинаковы ($x_{1\Sigma} \approx x_{2\Sigma}$).

В этих условиях $K_{(2-3)} = \sqrt{3}/2$, т. е. ток двухфазного замыкания меньше тока трехфазного, и они находятся в соотношении:

$$I_K^{(2)} \approx 0,87 I_K^{(3)}.$$

При однофазном КЗ $m = 3$, $x_\Delta = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$. Суммарное сопротивление нулевой последовательности изменяется в широких пределах ($0 < x_{0\Sigma} < \infty$). При этих условиях отношение токов составит

$$0 < K_{(1-3)} < 1,5.$$

Нижний предел наступает при $x_{0\Sigma} = \infty$, а верхний – при $x_{0\Sigma} = 0$.

Для двухфазного КЗ на землю

$$m = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}, \quad x_\Delta = x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma}.$$

Принимая $x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma}$ и $x_{0\Sigma} = 0$, находим верхний предел $K_{(1.1-3)} = \sqrt{3}$. При разземлении всех нейтралей $x_{0\Sigma} = \infty$, и данный вид КЗ переходит в простое двухфазное, давая нижний предел отношения $K_{(1.1-3)}$, равным $\sqrt{3}/2$. Следовательно,

$$\frac{\sqrt{3}}{2} < K_{(1.1-3)} < \sqrt{3}.$$

С точки зрения изменения соотношений между токами $I_K^{(1)}$ и $I_K^{(1.1)}$, по сравнению с током трехфазного замыкания $I_K^{(3)}$, существует граничное условие: при равенстве результирующих сопротивлений всех трех последовательностей ($x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = x_{0\Sigma}$) наблюдается равенство токов однофазного, двухфазного на землю и трехфазного коротких замыканий ($I_K^{(1)} = I_K^{(1.1)} = I_K^{(3)}$). По мере увеличения $x_{0\Sigma}$ значения токов $I_K^{(1)}$ и $I_K^{(1.1)}$ становятся меньше тока $I_K^{(3)}$ и, наоборот, при $x_{0\Sigma} < x_{1\Sigma}$ токи несимметричных замыканий $K^{(1)}$, $K^{(1.1)}$ превосходят ток трехфазного КЗ. Суммарное сопротивление нулевой последовательности зависит от количества заземленных нейтралей в системе. Увеличение межсистемных связей и трансформаторов с заземленной нейтралью приводит к снижению $x_{0\Sigma}$ и, соответственно, к росту токов несимметричных КЗ, усложняя условия работы выключателей.

7.7. Комплексные схемы замещения

Полученные в предшествующих разделах (7.2–7.4) соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений в месте КЗ позволяют для каждого вида несимметрии соединить между собой схемы отдельных последовательностей и образовать *комплексную схему замещения* (рис. 7.8).

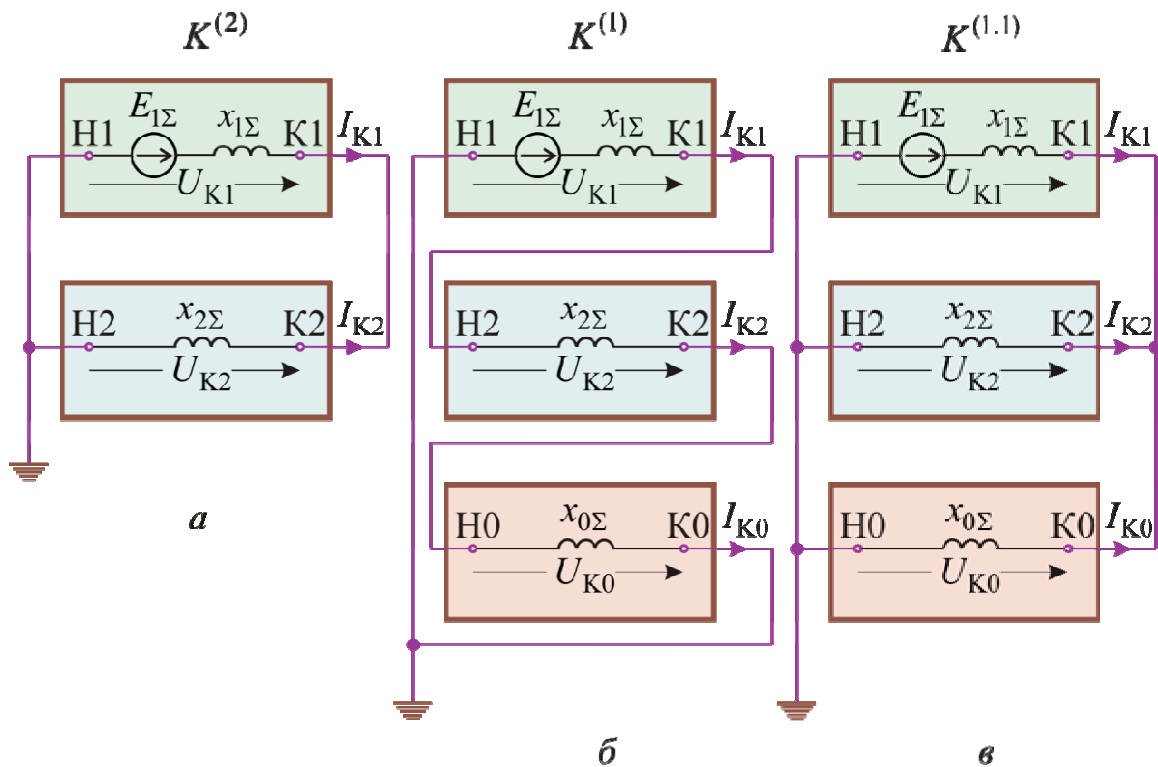


Рис. 7.8. Комплексные схемы замещения при несимметричном КЗ: а – двухфазном; б – однофазном; в – двухфазном на землю (Н – начало схемы, К – конец схемы)

Соединение осуществляется сверхпроводниками; способ соединения зависит от вида КЗ. Здесь каждый прямоугольник представляет собой эквивалентную схему замещения определенной последовательности, окаймленную клеммами начала (Н) и конца (К), между которыми и осуществляются соединения.

Для двухфазного короткого замыкания $K^{(2)}$ были получены соотношения для симметричных составляющих тока ($I_{Ka1} = -I_{Ka2}$) и напряжения ($U_{Ka1} = U_{Ka2}$), которые соблюдаются и в комплексной схеме (рис. 7.8, а).

При $K^{(1)}$ имеем $I_{Ka1} = I_{Ka2} = I_{K0}$, что отвечает последовательному соединению схем прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При этом также выполняется условие для напряжения поврежденной фазы: $U_{Ka1} + U_{Ka2} + U_{K0} = 0$.

Двухфазному замыканию на землю соответствует параллельное соединение схем прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно клемм Н и К, что отвечает равенству симметричных составляющих напряжений ($U_{Ka1} = U_{Ka2} = U_{K0}$).

Комплексные схемы замещения хорошо иллюстрируют правило эквивалентности прямой последовательности и удобны при использовании вычислительной техники.

Для расчета тока прямой последовательности наряду со схемой прямой последовательности требуется знание дополнительного сопротивления $x_{\Delta}^{(n)}$. Его вычисление для сложных схем затруднительно. Использование комплексных схем замещения при расчетах несимметричных режимов по компьютерным программам устраняет указанное затруднение и позволяет дополнительно иметь картину распределения токов отдельных последовательностей на интересующих элементах.

На рис. 7.9, а приведена схема, для которой на рис. 7.9, б представлена комплексная схема замещения для случая двухфазного короткого замыкания $K^{(2)}$.

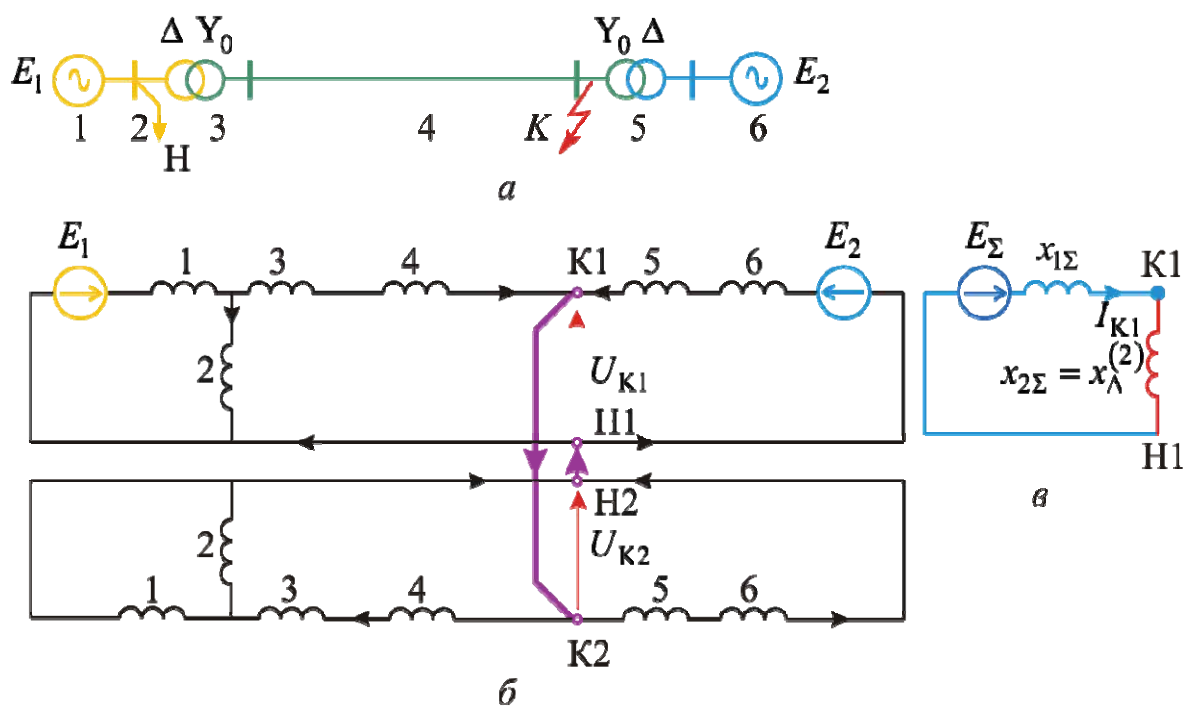


Рис. 7.9. Принципиальная схема (а); комплексная схема (б), соответствующая $K^{(2)}$, и схема (в), эквивалентная току прямой последовательности

На ее базе несложно получить *схему* (см. рис. 7.9, в), *эквивалентную токам прямой последовательности*. Это осуществляется простыми преобразованиями. Для схемы прямой последовательности результирующая реактивность и ЭДС рассчитываются по таким выражениям:

$$x_{1A} = x_1 // x_2 + x_3 + x_4, \quad x_{1B} = x_5 + x_6, \quad x_{1\Sigma} = x_{1A} // x_{1B};$$

$$E_{\Sigma} = \frac{E_1 x_{1B} + E_2 x_{1A}}{x_{1A} + x_{1B}}.$$

Аналогично для схемы обратной последовательности находим

$$x_{2\Sigma} = x_{\Delta}^{(2)}.$$

Комплексная схема замещения для однофазного замыкания на землю $K^{(1)}$ приведена на рис. 7.10, а.

Соответствующая ей схема, эквивалентная току прямой последовательности, представлена на рис. 7.10, б. Как и ранее (см. рис. 7.9, в), она представляет результирующую схему прямой последовательности, к концу которой подключен дополнительный реактанс $x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$. На основе этой схемы можно рассчитать ток прямой последовательности $I_{K1}^{(1)}$.

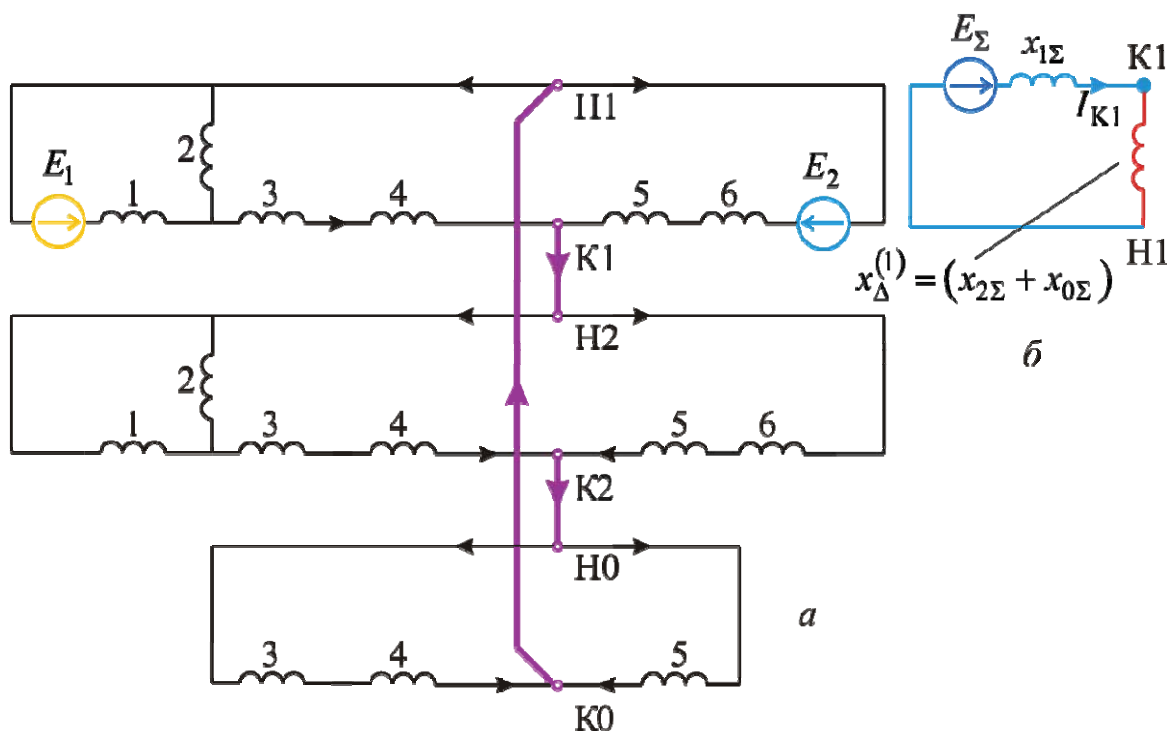


Рис. 7.10. Комплексная схема замещения (а) для $K^{(1)}$ и схема (б), эквивалентная току прямой последовательности

7.8. Распределение и трансформация симметричных составляющих токов и напряжений в электрической системе

Полученные в предыдущих разделах расчетные выражения и векторные диаграммы для токов и напряжений дают полную картину соотношения параметров режима в точке КЗ. Но часто практический интерес представляют параметры в местах установки измерительных органов релейной защиты или коммутационной аппаратуры. Возникает задача оценки уровней токов и напряжений в точках, электрически удаленных от места КЗ.

Для расчета фазных токов в произвольной ветви схемы необходимо для этой ветви предварительно найти токи прямой, обратной и нулевой последовательностей. Далее, используя общие выражения (6.2)–(6.4), можно определить интересующие фазные токи. Как известно, каждую последовательность можно рассматривать независимо (автономно) от других последовательностей. Следовательно, для расчета симметричных составляющих тока в интересующей ветви необходимо поочередно развернуть схему каждой последовательности, руководствуясь известными правилами и законами распределения токов в линейных цепях. Распределение токов или коэффициентов токораспределения c между двумя параллельными ветвями с источниками E_1 и E_2 зависит не от абсолютных значений E_1 и E_2 , а от их разности (см. формулы табл. 5.1). Это позволяет при нахождении токораспределения в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей условно принимать симметричные составляющие напряжений в месте КЗ равными нулю ($U_{K1} = 0, U_{K2} = 0, U_{K0} = 0$). Естественно, это недопустимо при расчетах остаточных напряжений в узлах схемы.

При использовании коэффициентов токораспределения токи прямой, обратной и нулевой последовательностей для любого участка М схемы можно представить как функции токов тех же последовательностей в месте КЗ, т. е.

$$\mathbf{I}_{M1} = c_{M1}\mathbf{I}_{K1}, \mathbf{I}_{M2} = c_{M2}\mathbf{I}_{K2}, \mathbf{I}_{M0} = c_{M0}\mathbf{I}_{K0}, \quad (7.37)$$

где c_{M1}, c_{M2}, c_{M0} – коэффициенты токораспределения ветви М в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Коэффициенты c_{M1} схемы прямой последовательности зависят от вида несимметричного КЗ и являются функцией тока \mathbf{I}_{K1} . В формулах табл. 5.1 значение $I_{\Pi\Sigma}$ необходимо заменить током \mathbf{I}_{K1} . Поскольку

схемы обратной и нулевой последовательностей являются пассивными, то коэффициенты c_{M2} , c_{M0} не зависят от вида КЗ, т. е. от \mathbf{I}_{K2} и \mathbf{I}_{K0} .

Для нахождения фазных напряжений произвольного узла М схемы требуется предварительно определить симметричные составляющие напряжений этого узла. Последние находят, как напряжение рассматриваемой последовательности в месте КЗ плюс сумму падений напряжения на участках, соединяющих рассматриваемый узел с местом КЗ той же последовательности, т. е.

$$\left. \begin{aligned} U_{M1} &= U_{K1} + \sum \mathbf{I}_{1j} x_{1j}; \\ U_{M2} &= U_{K2} + \sum \mathbf{I}_{2j} x_{2j}; \\ U_{M0} &= U_{K0} + \sum \mathbf{I}_{0j} x_{0j}. \end{aligned} \right\} \quad (7.38)$$

Чтобы в наглядной форме показать распределение остаточных напряжений отдельных последовательностей при различных видах КЗ, на рис. 7.11, б, в, г построены эпюры напряжений отдельных последовательностей вдоль элементов рассматриваемой схемы (см. рис. 7.11, а).

По мере удаления от точки короткого замыкания напряжения обратной (U_2) и нулевой (U_0) последовательностей по абсолютной величине уменьшаются. Остаточное напряжение $U_2 = 0$ в точке нулевого потенциала генератора; напряжение U_0 становится равным нулю на стороне обмотки трансформатора, соединенной в «треугольник». Напряжение прямой последовательности (U_1) по мере удаления от точки короткого замыкания увеличивается, принимая значение E'' за реактансом источника питания.

При переходе через трансформатор симметричные составляющие токов и напряжений изменяются не только по величине, но также и по фазе, в зависимости от группы соединения его обмоток. Для учета этого фактора пользуются *комплексными коэффициентами трансформации* прямой и обратной последовательностей соответственно для напряжения и тока:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_{U_1} &= k e^{j30^\circ N}, & \mathbf{k}_{I_1} &= \hat{\mathbf{k}}_{U_1} = k e^{-j30^\circ N}; \\ \mathbf{k}_{U_2} &= \hat{\mathbf{k}}_{U_1} = k e^{-j30^\circ N}, & \mathbf{k}_{I_2} &= k e^{j30^\circ N}, \end{aligned} \quad (7.39)$$

где $k = \frac{U_Y}{U_\Delta}$ – модуль коэффициента трансформации; N – номер группы соединения обмоток трансформатора в соответствии с известным правилом часового циферблата.

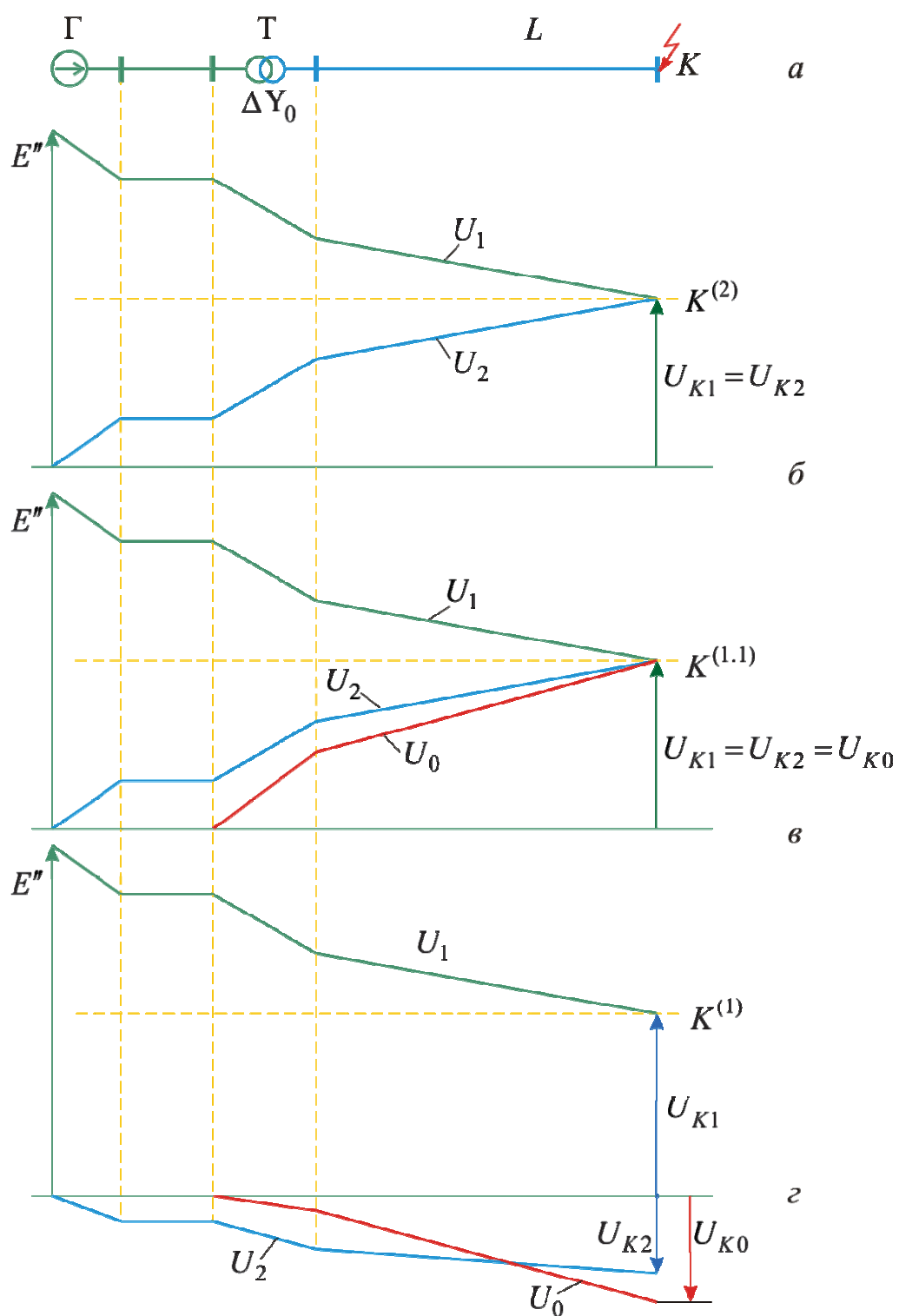


Рис. 7.11. Принципиальная схема (а) и эюры напряжений отдельных последовательностей при двухфазном (б), двухфазном на землю (в) и однофазном (г) коротких замыканиях

Коэффициенты трансформации по току \mathbf{k}_{I_1} , \mathbf{k}_{I_2} приняты сопряженными к соответствующим коэффициентам трансформации по напряжению из условия инвариантности мощности. При переходе через трансформатор в обратном направлении, т. е. (Δ / Y) угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

Для наиболее распространенной группы соединения обмоток трансформатора $Y_0 / \Delta - 11$ считаем симметричные составляющие напряжений \mathbf{U}_{A1} , \mathbf{U}_{A2} и токов \mathbf{I}_{A1} , \mathbf{I}_{A2} со стороны обмотки, соединенной в Y_0 , известными. При этом величины \mathbf{U}_{A1} и \mathbf{U}_{A2} включают падение напряжения в трансформаторе. Тогда выражения для токов и напряжений на стороне трансформатора, соединенной в «треугольник», будут определяться по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_a &= \mathbf{I}_{a1} + \mathbf{I}_{a2} = \\ &= k \left(\mathbf{I}_{A1} e^{-j330^\circ} + \mathbf{I}_{A2} e^{j330^\circ} \right) = k \left(\mathbf{I}_{A1} e^{j30^\circ} + \mathbf{I}_{A2} e^{-j30^\circ} \right); \\ \mathbf{U}_a &= \mathbf{U}_{a1} + \mathbf{U}_{a2} = \\ &= \frac{1}{k} \left(\mathbf{U}_{A1} e^{-j330^\circ} + \mathbf{U}_{A2} e^{j330^\circ} \right) = \frac{1}{k} \left(\mathbf{U}_{A1} e^{j30^\circ} + \mathbf{U}_{A2} e^{-j30^\circ} \right). \end{aligned} \right\} \quad (7.40)$$

Другими словами, при переходе со стороны «звезды» на сторону «треугольника» трансформатора для группы $N = 11$ векторы прямой последовательности поворачиваются на 30° в положительном направлении, а векторы обратной последовательности – на 30° в противоположном направлении (рис. 7.12).

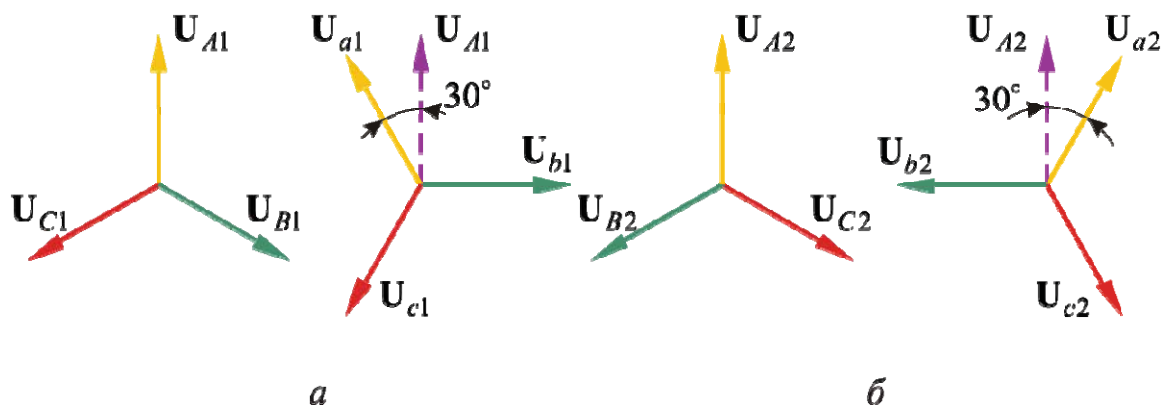


Рис. 7.12. Фазовый сдвиг напряжений прямой (а) и обратной (б) последовательностей при переходе через трансформатор с соединением $Y / \Delta - 11$

Нулевая последовательность на вторичной стороне трансформатора (Δ) отсутствует.

Наиболее простые соотношения получаются для трансформатора с соединением обмоток по группе 12, т. к. в этом случае угловые смещения токов и напряжений вообще отсутствуют. Поэтому для трансформатора с четной группой соединения обмоток (Y/Y) или (Δ/Δ), если не требуется знать действительной ориентации токов и напряжений одной его стороны по отношению к этим же величинам на другой его стороне, обычно принимают соединение обмоток по группе 12. При этом для соединения (Y_0/Y_0) должна быть учтена нулевая последовательность токов и напряжений, которая фазовых сдвигов не претерпевает.

При нечетной группе соединения обмоток трансформатора (Y_0/Δ), (Δ/Y) для простоты можно считать его соединение по группе 3 (или 9), поскольку при этом векторы прямой и обратной последовательностей поворачиваются на 90° в противоположные направления. Очевидно, векторы прямой последовательности можно оставить без смещения, а векторы обратной последовательности сдвинуть на 180° .

Следует особо подчеркнуть, что если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги в соответствии с группой соединения обмоток трансформатора.

Отметим, что учет фазового сдвига токов и напряжений необходим при расчетах несимметричных коротких замыканий для выбора параметров релейной защиты трансформаторов.

В разд. 7.2–7.4 были приведены векторные диаграммы токов и напряжений в местах несимметричных коротких замыканий. По мере удаления от точки короткого замыкания указанные диаграммы претерпевают изменение.

На примере рис. 7.13 можно проследить «деформацию» векторных диаграмм напряжений и токов, построенных для характерных узлов схемы, при двухфазном коротком замыкании на землю в конце воздушной линии электропередачи. Трансформатор со схемой обмоток Y_0/Δ имеет 11 группу. Для сопоставимости векторов принято, что токи и напряжения приведены к одной ступени напряжения.

Наибольшее искажение векторная диаграмма напряжений имеет в месте КЗ. Для узлов схемы, расположенных ближе к генератору, это искажение становится все меньше. Полностью симметричной сохраняется система векторов ЭДС.

Векторные диаграммы токов в узлах Т и КЗ одинаковы, поскольку указанные узлы находятся в последовательной цепи. При переходе через трансформатор симметричные составляющие токов и напряжений претерпевают фазовый поворот в соответствии с выражениями (7.40).

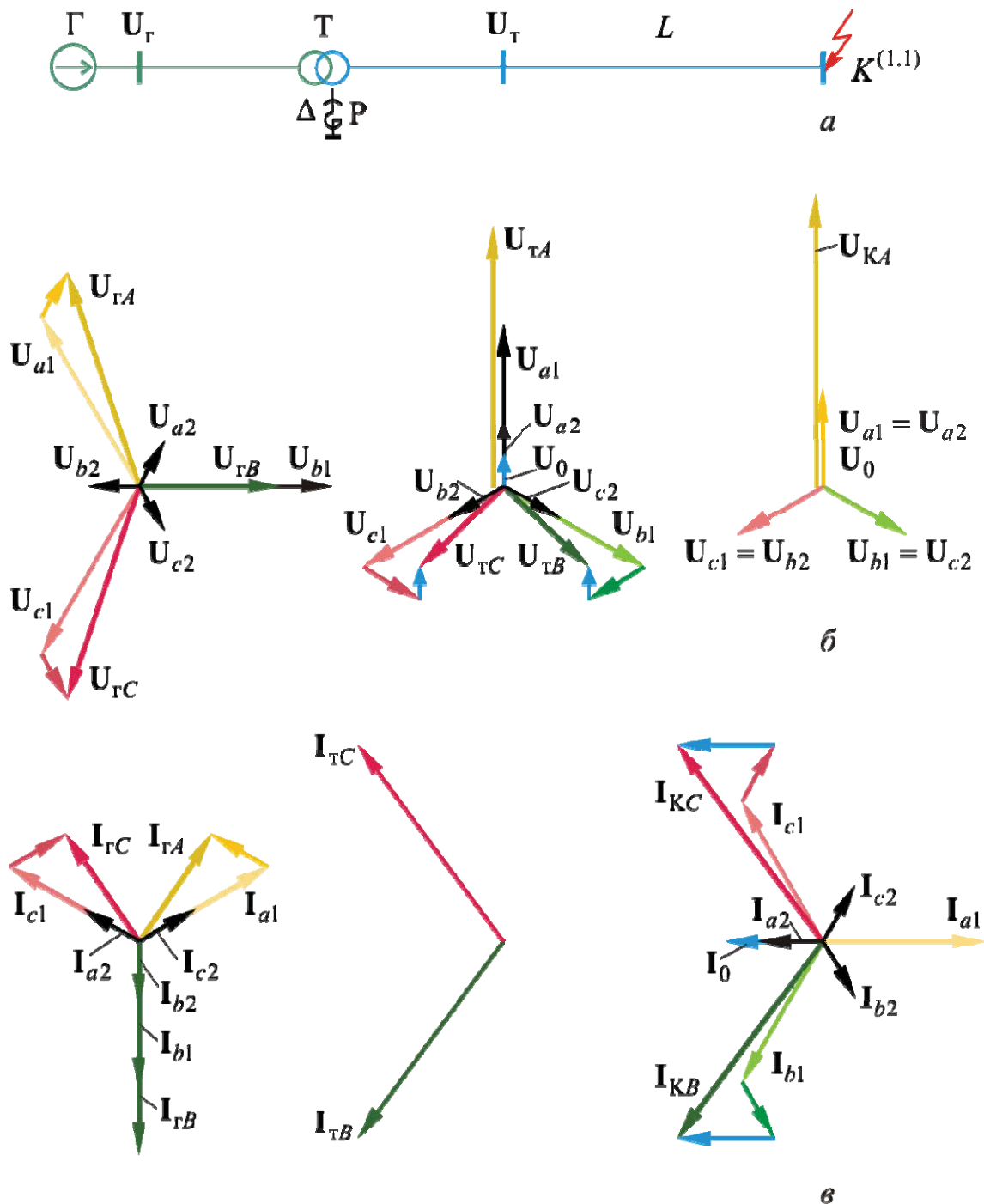


Рис. 7.13. Векторные диаграммы в характерных узлах схемы при $I_K^{(1.1)}$:
 а – принципиальная схема; б – диаграммы напряжений; в – диаграммы токов

7.9. Алгоритм расчета несимметричных коротких замыканий

Как было показано ранее (разд. 7.2–7.4), интересующие параметры по месту несимметричных коротких замыканий пропорциональны току прямой последовательности. В свою очередь, ток прямой последовательности для любого вида поперечной несимметрии определяется на основе правила эквивалентности прямой последовательности, согласно выражению (7.33), которое идентично расчету фиктивного трехфазного КЗ. Поэтому ниже приведена только последовательность основных этапов расчета поперечной несимметрии.

1. Составляется схема замещения прямой последовательности, в которую вводятся генерирующие источники питания и, при необходимости, двигательная нагрузка в соответствии с тем, как это осуществлялось при расчете трехфазного короткого замыкания (разд. 5.2).

Из схемы прямой последовательности находятся эквивалентная ЭДС ($E_{1\Sigma}$) и результирующее сопротивление ($x_{1\Sigma}$) относительно узла короткого замыкания.

2. Составляются схемы замещения обратной и нулевой последовательностей (разд. 6.3), из которых соответственно находятся $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$. В подавляющем большинстве практических расчетов в качестве схемы обратной последовательности можно принимать схему прямой последовательности, исключив из нее все ЭДС. При этом вполне приемлемо считать $x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma}$, что соответствует допущению $x_2 = x''$ для синхронных машин.

Схема замещения нулевой последовательности существенно отличается от прямой, так же как и реактивности для генераторов, воздушных и кабельных линий.

3. Определяется шунт короткого замыкания $x_{\Delta}^{(n)}$ и ток прямой последовательности по выражению (7.33).

4. Рассчитывается периодическая слагаемая тока КЗ поврежденных фаз по выражению (7.34).

Для вычисления остаточных напряжений в месте КЗ и их симметричных составляющих необходимо воспользоваться соответствующими расчетными выражениями, полученными в разд. 7.2–7.4.

Учет фазовых сдвигов векторов тока и напряжения, обусловленных трансформаторами, изложен в разд. 7.8.

Рассмотренные ниже примеры 7.1, 7.2 иллюстрируют характерные особенности расчета параметров для различных видов несимметричных коротких замыканий.

Пример 7.1. Для принципиальной схемы (рис. 7.14, а) при двухфазном коротком замыкании в точке $K^{(2)}$ для момента $t=0$ определить:

- периодическую слагаемую тока КЗ и ударный ток в месте КЗ;
- фазные токи и напряжения в узле K и на высшей стороне трансформатора Т1 (узел F).

Оценить вклад двигательной нагрузки ($M = M1 + M2$) в результирующий ток короткого замыкания.

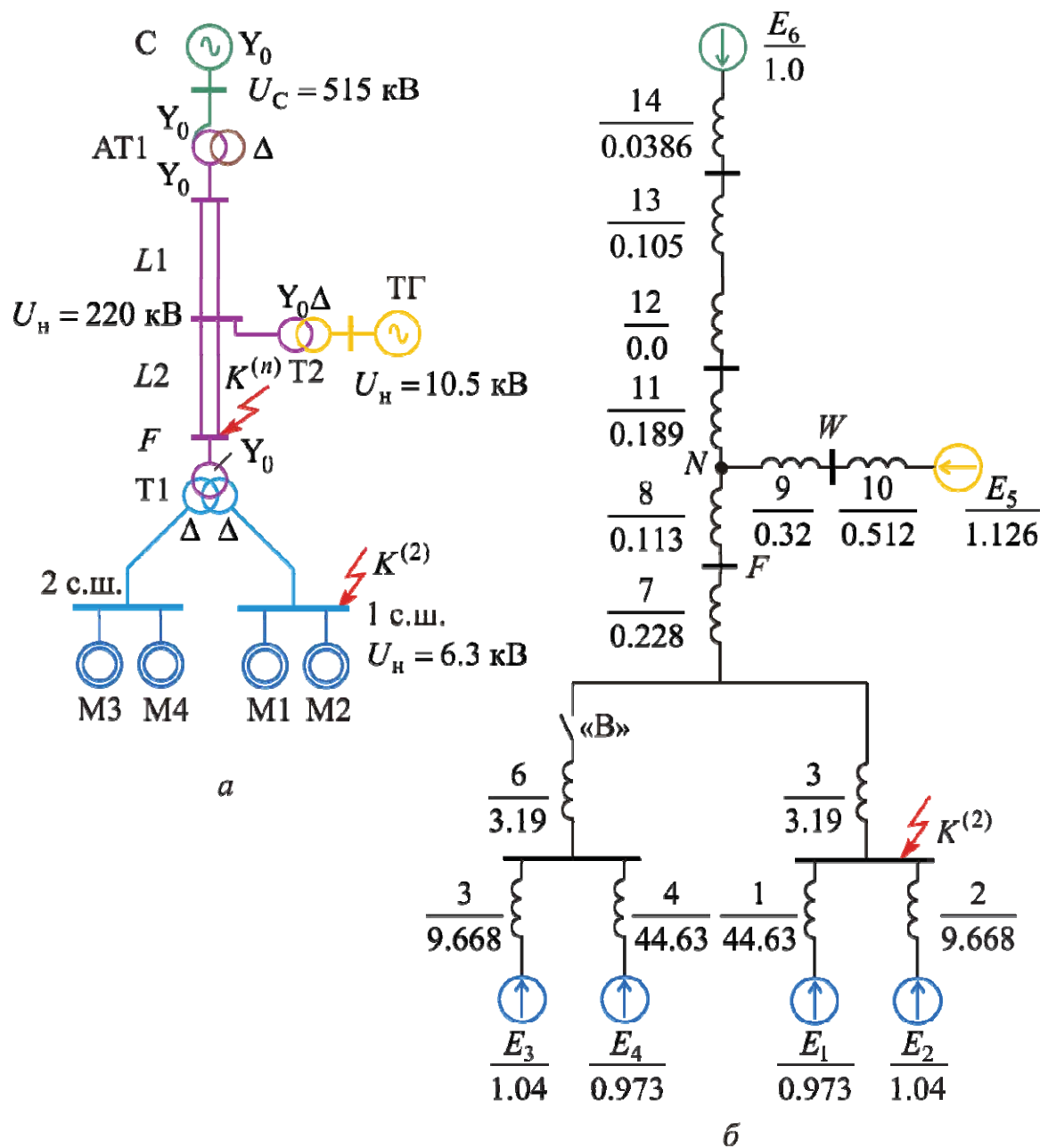


Рис. 7.14. К примерам 7.1 и 7.2: а – принципиальная схема; б – схема замещения прямой и обратной последовательностей

Исходные данные. Принципиальная схема (см. рис. 7.14, а) и исходные данные позаимствованы из примера 5.2. Параметры элементов схемы замещения (см. рис. 7.14, б) выражены в относительных единицах при тех же базисных условиях, что и в примере 5.2:

$$S_6 = 1000 \text{ МВА};$$

$$U_{61} = 6,3 \text{ кВ}, U_{62} = 10,5 \text{ кВ}, U_{63} = 230 \text{ кВ}, U_{64} = 515 \text{ кВ};$$

$$I_{61} = 91,75 \text{ кА}, I_{62} = 55 \text{ кА}, I_{63} = 2,51 \text{ кА}, I_{64} = 1,12 \text{ кА}.$$

Нумерация элементов схемы замещения (см. рис. 7.14, б) отличается от нумерации элементов схемы рис. 5.7, б в связи с введением двигателей второй секции шин (М3, М4). Эквивалентные синхронные двигатели М2, М3 одинаковы и имеют мощность 12,7 МВт каждый; асинхронные двигатели М1, М4 имеют единичную мощность по 3,2 МВт.

Решение. При двухфазном КЗ в точке $K^{(2)}$ влиянием двигательной нагрузки (М3, М4) второй секции шин можно пренебречь вследствие ее значительной электрической удаленности (за реактансами $x_6 + x_5$), чему соответствует отключенное положение выключателя В, см. рис. 7.14, б. Фазу ЭДС источников питания принимаем равной 90° .

Упростим схему прямой последовательности, приведя ее к виду (рис. 7.15):

$$x_{16} = x_9 + x_{10} = 0,832;$$

$$x_{17} = x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} = 0,333;$$

$$x_{18} = x_5 + x_7 = 3,418;$$

$$x_{19} = x_8 + x_{18} = 3,531.$$

Найдем результирующие ЭДС и реактивности схемы прямой последовательности:

$$x_{20} = x_{16} // x_{17} + x_{19} = \\ = 0,832 // 0,333 + 3,531 = 3,769;$$

$$E_7 = E_5 // E_6 = j1,036;$$

$$x_{21} = x_1 // x_2 = 44,63 // 9,668 = 7,946;$$

$$E_8 = E_1 // E_2 = j1,028;$$

$$x_{1\Sigma} = x_{20} // x_{21} = 3,769 // 7,946 = 2,556;$$

$$E_{1\Sigma} = E_7 // E_8 = j1,033.$$

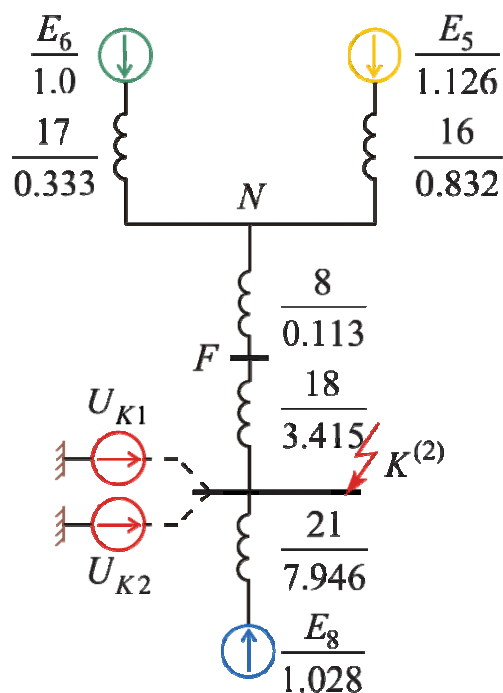


Рис. 7.15. Упрощенная схема прямой и обратной последовательностей (к примеру 7.1)

В схеме замещения прямой последовательности (см. рис. 7.15) в узле короткого замыкания приложено напряжение U_{K1} (подключено через штриховую линию).

Схема обратной последовательности полностью повторяет схему прямой последовательности с тем отличием, что все ЭДС равны нулю, а в узле КЗ приложено напряжение U_{K2} . Считая, что реактансы обратной последовательности генераторов и синхронных двигателей равны реактансам прямой последовательности, имеем $x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma} = 2,556$.

1. Расчет параметров аварийного режима по месту КЗ

Найдем симметричные составляющие токов и напряжений для особой фазы А:

$$\mathbf{I}_{K1} = \frac{\mathbf{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})} = \frac{j1,033}{j2 \cdot 2,556} = 0,2021, \quad \mathbf{I}_{K2} = -0,2021;$$

$$\mathbf{U}_{K1} = \mathbf{U}_{K2} = \mathbf{I}_{K1} jx_{2\Sigma} = j0,2021 \cdot 2,556 = j0,516.$$

Фазные токи и остаточные напряжения по месту короткого замыкания в относительных единицах составляют:

$$|I_{KB}| = |I_{KC}| = \sqrt{3}I_{K1} = \sqrt{3} \cdot 0,2021 = 0,35; \quad I_{KA} = 0;$$

$$\mathbf{U}_{KA} = 2\mathbf{U}_{K1} = j2 \cdot 0,516 = j1,032;$$

$$\mathbf{U}_{KB} = \mathbf{U}_{KC} = -\mathbf{U}_{K1} = -j0,516.$$

Для перехода к именованным величинам необходимо токи умножить на $I_{\delta 1} = 91,75$ кА, напряжения – на $U_{\delta 1}/\sqrt{3} = 6,3/\sqrt{3}$ кВ.

Принимая единый ударный коэффициент для всех источников питания, равный 1,916 (см. пример 5.2), находим ударный ток КЗ:

$$i_y = \sqrt{2}I_{KB}K_y I_{\delta 1} = \sqrt{2} \cdot 0,35 \cdot 1,916 \cdot 91,75 = 87 \text{ кА}.$$

Рассчитаем симметричные составляющие токов в трансформаторе Т1 (ветвь 18):

$$\mathbf{I}_{1(18)} = \frac{(\mathbf{E}_7 - \mathbf{U}_{K1})}{jx_{20}} = \frac{j(1,036 - 0,516)}{j3,769} = 0,1376;$$

$$\mathbf{I}_{2(18)} = \frac{(0 - \mathbf{U}_{K2})}{jx_{20}} = \frac{-j0,516}{j3,769} = -0,1369.$$

Ток прямой последовательности от эквивалентных двигателей составляет

$$\mathbf{I}_{1(21)} = \mathbf{I}_{K1} - \mathbf{I}_{1(18)} = 0,2021 - 0,1376 = 0,0645.$$

Находим вклад двигателей в суммарный ток КЗ (в %):

$$\frac{\sqrt{3}I_{1(21)}}{\sqrt{3}I_{K1}} 100\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,0645}{\sqrt{3} \cdot 0,2021} \cdot 100\% = 31,9\%,$$

такой же, что и при $K^{(3)}$.

2. Расчет параметров аварийного режима на высшей стороне трансформатора Т1

Симметричные составляющие напряжения в узле F без учета фазового сдвига, обусловленного переходом через трансформатор Т1, равны:

$$\mathbf{U}_{1F} = \mathbf{U}_{K1} + \mathbf{I}_{1(18)}jx_{18} = j(0,516 + 0,1376 \cdot 3,418) = j0,9863;$$

$$\mathbf{U}_{2F} = \mathbf{U}_{K2} + \mathbf{I}_{2(18)}jx_{18} = j(0,516 - 0,1376 \cdot 3,418) = j0,048.$$

Рассчитаем фазные напряжения в узле F с учетом фазового сдвига в Т1, имеющего группу $\Delta/Y_0 - 11$. При переходе через Т1 со стороны Δ на сторону Y вектора прямой последовательности поворачиваются на угол -30° , обратной последовательности – на угол 30° :

$$\mathbf{U}_a = \left(\mathbf{U}_{1F}e^{-j30^\circ} + \mathbf{U}_{F2}e^{j30^\circ} \right) = 0,9863e^{j60^\circ} + 0,048e^{j120^\circ} = 1,011e^{j62,3^\circ};$$

$$\mathbf{U}_b = \left(a^2\mathbf{U}_{1F}e^{-j30^\circ} + a\mathbf{U}_{F2}e^{j30^\circ} \right) = 0,9863e^{j300^\circ} + 0,048e^{j240^\circ} = 1,011e^{-j62,3^\circ};$$

$$\mathbf{U}_c = \left(a\mathbf{U}_{1F}e^{-j30^\circ} + a^2\mathbf{U}_{F2}e^{j30^\circ} \right) = 0,9863e^{j180^\circ} + 0,048e^{j360^\circ} = -0,938.$$

Находим фазные токи в обмотке высшего напряжения трансформатора Т1 с учетом 11 группы соединения его обмоток:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_a &= \mathbf{I}_{1(18)}e^{-j30^\circ} + \mathbf{I}_{2(18)}e^{j30^\circ} = \\ &= 0,1376e^{-j30^\circ} - 0,1369e^{j30^\circ} = 0,1372e^{-j89,74^\circ}; \end{aligned}$$

$$\mathbf{I}_b = a^2\mathbf{I}_{1(18)}e^{-j30^\circ} + a\mathbf{I}_{2(18)}e^{j30^\circ} = 0,1372e^{-j90,26^\circ};$$

$$\mathbf{I}_c = 0,1376e^{j90^\circ} - 0,1369e^{j270^\circ} = 0,274e^{j90^\circ}.$$

На рис. 7.16 по результатам расчетов построены векторные диаграммы токов и напряжений для узлов K и F в относительных единицах (для их сопоставимости).

Как видно, напряжения в узле F практически образуют симметричную «звезду» и по уровню соответствуют номинальному режиму.

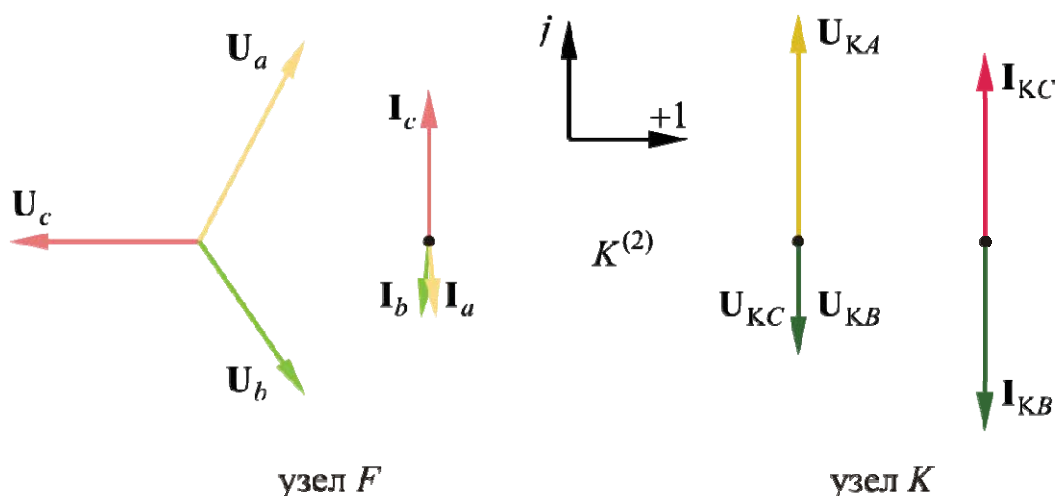


Рис. 7.16. Векторные диаграммы токов и напряжений для $K^{(2)}$ (к примеру 7.1)

Пример 7.2. Для принципиальной схемы (см. рис. 7.14, а) для случаев трехфазного, двухфазного, однофазного и двухфазного на землю коротких замыканий в узле $K^{(n)}$ для $t = 0$ определить:

- периодическую слагаемую тока КЗ и ударный ток в месте КЗ;
- фазные токи в линии $L2$ и в цепи генератора, фазные напряжения в узле $K^{(n)}$ и на шинах генератора;
- ток в нейтралях АТ1 и Т2;
- оценить вклад двигательной нагрузки М1–М4 в результирующий ток.

Исходные данные. Принципиальная схема (рис. 7.14, а) и исходные данные позаимствованы из примера 5.2. Параметры схемы замещения прямой и обратной последовательностей (рис. 7.14, б) выражены в относительных единицах при тех же базисных условиях, что и в примерах 5.2 и 7.1:

$$S_{\bar{0}} = 1000 \text{ МВА},$$

$$U_{\bar{0}1} = 6,3 \text{ кВ}, U_{\bar{0}2} = 10,5 \text{ кВ}, U_{\bar{0}3} = 230 \text{ кВ}, U_{\bar{0}4} = 515 \text{ кВ};$$

$$I_{\bar{0}1} = 91,75 \text{ кА}, I_{\bar{0}2} = 55 \text{ кА}, I_{\bar{0}3} = 2,51 \text{ кА}, I_{\bar{0}4} = 1,12 \text{ кА}.$$

Трансформатор Т2 имеет схему соединения обмоток $Y_0 / \Delta - 11$.

Для расчета параметров схемы нулевой последовательности имеем дополнительные сведения и данные: воздушные линии $L1$, $L2$ – двухцепные с хорошо проводящим тросом ($x_0/x_1 = 3$). Для питающей

системы принимаем $x_{C(0)}/x_{C(1)} = 1,5$; для обмотки низшего напряжения АТ1, соединенной в «треугольник», имеем $U_{K(H)} = 18,5\%$ (см. пример 5.2). Расчетная реактивность этой обмотки (Δ) составляет $x_{15^*} = 0,185$, которая отражена на схеме нулевой последовательности (рис. 7.17, б).

Решение. Для рассматриваемых коротких замыканий на высшей стороне трансформатора Т1 (узел $K^{(n)}$) учитываем двигательную нагрузку обеих секций шин (выключатель В на рис. 6.25, б замкнут).

На рис. 7.17, а представлена частично преобразованная схема прямой и обратной последовательностей, полученная на основе другой схемы (рис. 7.14, б). Этапы этого преобразования отражены в примере 7.1.

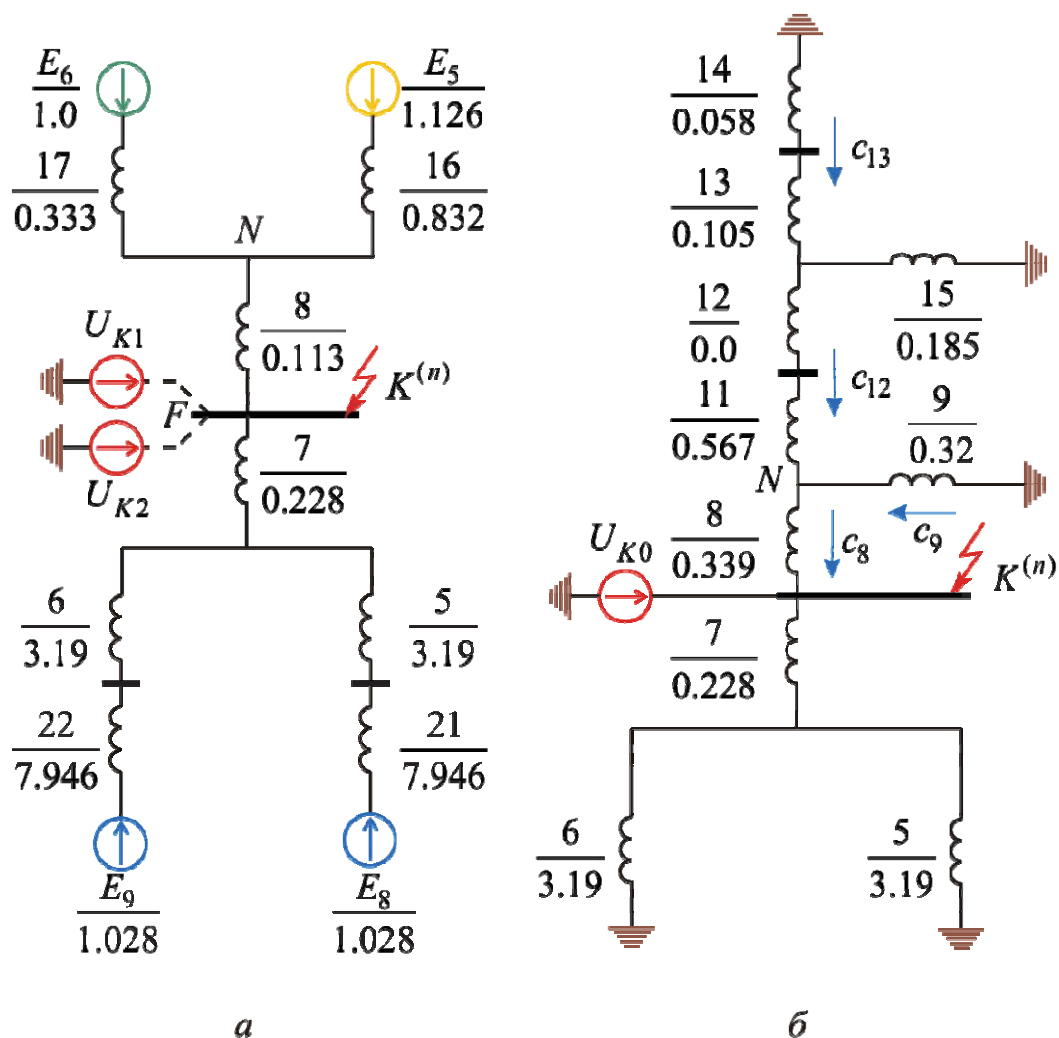


Рис. 7.17. Упрощенная схема прямой, обратной (а) и нулевой (б) последовательностей (к примеру 7.2)

Схема нулевой последовательности представлена на рис. 7.17, б. По отношению к параметрам схемы прямой последовательности в ней изменились реактансы элементов 8, 11 (L_2, L_1), 14 (система), и появился новый элемент 15 (обмотка АТ1 с соединением «треугольник»). Для всех прочих элементов сопротивления остались теми же, что и в прямой последовательности.

В процессе расчета используются схемы рис. 7.17 и рис. 7.14, б. Как и ранее (пример 7.1), фазу ЭДС источников питания принимаем 90° .

Последовательным преобразованием схемы (см. рис. 7.17, а) прямой (обратной) последовательности находим результирующие параметры относительно места КЗ:

$$x_{CГ} = x_{23} = x_{16} // x_{17} + x_8 = 0,832 // 0,333 + 0,113 = 0,35;$$

$$\mathbf{E}_7 = \mathbf{E}_5 // \mathbf{E}_6 = j1,036;$$

$$x_M = x_{24} = 0,5(x_5 + x_{21}) + x_7 = 0,5 \cdot (3,19 + 7,946) + 0,228 = 5,8;$$

$$\mathbf{E}_{10} = \mathbf{E}_8 // \mathbf{E}_9 = j1,028, \mathbf{E}_{1\Sigma} = \mathbf{E}_7 // \mathbf{E}_{10} = j1,0355;$$

$$x_{1\Sigma} = x_{23} // x_{24} = 0,35 // 5,8 = 0,33, x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma} = 0,33.$$

Аналогично, осуществляя преобразования схемы нулевой последовательности (см. рис. 7.17, б), рассчитываем результирующую реактивность относительно точки КЗ:

$$x_{25} = x_{13} + x_{14} = 0,105 + 0,058 = 0,163;$$

$$x_{26} = x_{25} // x_{15} + x_{12} + x_{11} = 0,163 // 0,185 + 0,567 = 0,654;$$

$$x_{CГ} = x_{27} = x_{26} // x_9 + x_8 = 0,654 // 0,32 + 0,339 = 0,554;$$

$$x_M = x_{28} = 0,5x_5 + x_7 = 1,823;$$

$$x_{0\Sigma} = x_{27} // x_{28} = 0,554 // 1,823 = 0,425.$$

Определим коэффициенты токораспределения в схеме нулевой последовательности ($c_0 = 1$ и соответствует току I_{K0}):

$$c_8 = \frac{c_0 x_{28}}{x_{28} + x_{27}} = \frac{1 \cdot 1,823}{2,377} = 0,767;$$

$$c_9 = \frac{c_8 x_{26}}{x_{26} + x_9} = \frac{0,767 \cdot 0,654}{0,974} = 0,515;$$

$$c_{12} = c_8 - c_9 = 0,767 - 0,515 = 0,252;$$

$$c_{13} = \frac{c_{12} x_{15}}{x_{15} + x_{25}} = \frac{0,252 \cdot 0,185}{0,348} = 0,134.$$

Трехфазное короткое замыкание

Рассчитаем периодическую слагаемую тока короткого замыкания:

$$\mathbf{I}_K = \frac{\mathbf{E}_{1\Sigma}}{jx_{1\Sigma}} = \frac{j1,0355}{j0,33} = 3,14$$

и ударный ток:

$$i_y = \sqrt{2}I_K K_y I_{\beta 1} = \sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 1,72 \cdot 2,51 = 19,2 \text{ кА},$$

где $K_y = 1,72$, принят по табл. 5.3, позиция 11.

Находим токи короткого замыкания, обусловленные системой и генератором (линия L2):

$$\mathbf{I}_{CГ} = \frac{\mathbf{E}_7}{jx_{23}} = \frac{j1,036}{j0,35} = 2,96$$

и двигателями М:

$$\mathbf{I}_M = \frac{\mathbf{E}_{10}}{jx_{24}} = \frac{j1,028}{j5,8} = 0,177.$$

Вклад двигателей в результирующий ток КЗ составляет

$$\frac{I_M}{I_K} 100\% = \frac{0,177}{3,14} \cdot 100\% = 5,6\%.$$

Рассчитываем ток КЗ, обусловленный генераторами:

$$\mathbf{I}_Г = \frac{\mathbf{I}_{CГ} jx_{17} + (\mathbf{E}_5 - \mathbf{E}_6)}{j(x_{16} + x_{17})} = \frac{j(2,96 \cdot 0,333 + 1,126 - 1)}{j1,165} = 0,954$$

и с учетом перехода через трансформатор Т2 – 11 группы

$$\mathbf{I}_{Гa} = 0,954e^{j30^\circ}.$$

Напряжение генератора, при фазовом сдвиге на трансформаторе Т2 (см. рис. 7.17, а и б) определится так:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{Гa} &= (0 + \mathbf{I}_{CГ} jx_8 + \mathbf{I}_Г jx_9) e^{j30^\circ} = \\ &= j(2,96 \cdot 0,113 + 0,954 \cdot 0,32) e^{j30^\circ} = 0,64e^{j120^\circ}. \end{aligned}$$

Двухфазное короткое замыкание

Определяем симметричные составляющие токов и напряжений особой фазы А в месте короткого замыкания:

$$\mathbf{I}_{K1} = \frac{\mathbf{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})} = \frac{j1,055}{j2 \cdot 0,33} = 1,569, \quad I_{K2} = -1,569;$$

$$\mathbf{U}_{K1} = \mathbf{U}_{K2} = \mathbf{I}_{K1} jx_{2\Sigma} = j1,569 \cdot 0,33 = j0,5178.$$

Фазные токи и напряжения в месте короткого замыкания составляют:

$$|I_{KB}| = |I_{KC}| = \sqrt{3} I_{K1} = 2,71, \quad I_{KA} = 0;$$

$$\mathbf{U}_{KA} = 2\mathbf{U}_{K1} = j1,0356, \quad \mathbf{U}_{KB} = \mathbf{U}_{KC} = -\mathbf{U}_{K1} = -j0,5178.$$

Для перехода к именованным величинам необходимо токи умножить на $I_{\text{б3}} = 2,51$ кА, напряжения – на $U_{\text{б3}}/\sqrt{3} = 230/\sqrt{3}$ кВ.

Принимая $K_y = 1,72$ (см. $K^{(3)}$), находим ударный ток

$$i_y = \sqrt{2} I_{KB} K_y I_{\text{б3}} = \sqrt{2} \cdot 2,71 \cdot 1,72 \cdot 2,51 = 16,54 \text{ кА.}$$

Симметричные составляющие токов в линии $L2$ (ветвь 8):

$$\mathbf{I}_{1(8)} = \frac{\mathbf{E}_7 - \mathbf{U}_{K1}}{jx_{23}} = \frac{j(1,036 - 0,5178)}{j0,35} = 1,48;$$

$$\mathbf{I}_{2(8)} = \frac{0 - \mathbf{U}_{K2}}{jx_{23}} = \frac{-j0,5178}{j0,35} = -1,479.$$

Фазные токи в линии $L2$:

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_{1(8)} + \mathbf{I}_{2(8)} = 1,48 - 1,479 = 0,001;$$

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{I}_C = 1,48 e^{j240^\circ} - 1,479 e^{j120^\circ} = 2,562 e^{-j90^\circ};$$

$$\mathbf{I}_C = 2,562 e^{j90^\circ}.$$

Определим ток прямой последовательности от двигателей:

$$\mathbf{I}_{1(7)} = \mathbf{I}_{K1} - \mathbf{I}_{1(8)} = 1,569 - 1,48 = 0,089$$

и их вклад в суммарный ток короткого замыкания:

$$\frac{\sqrt{3} I_{1(7)}}{\sqrt{3} I_{K1}} 100\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,089}{\sqrt{3} \cdot 1,569} \cdot 100\% = 5,7\%.$$

Рассчитаем симметричные составляющие токов в генераторах (элемент 16, см. рис. 7.17, а) без учета фазового сдвига в Т2:

$$\mathbf{I}_{1(16)} = \frac{\mathbf{I}_{1(8)} jx_{17} + \mathbf{E}_5 - \mathbf{E}_6}{j(x_{16} + x_{17})} = \frac{j(1,48 \cdot 0,333 + 1,126 - 1,0)}{j(0,832 + 0,333)} = 0,531;$$

$$\mathbf{I}_{2(16)} = \frac{\mathbf{I}_{2(8)} jx_{17}}{j(x_{16} + x_{17})} = \frac{-j1,479 \cdot 0,333}{j1,165} = -0,423.$$

Находим симметричные составляющие напряжения генераторов (см. рис. 7.14, б, узел W), отталкиваясь от потенциалов генераторов:

$$\mathbf{U}_{\Gamma 1} = \mathbf{E}_5 - \mathbf{I}_{1(16)} jx_{10} = j(1,126 - 0,531 \cdot 0,512) = j0,854;$$

$$\mathbf{U}_{\Gamma 2} = 0 - \mathbf{I}_{2(16)} jx_{10} = j0,423 \cdot 0,512 = j0,216.$$

Фазные токи и напряжения генераторов, с учетом перехода с Y_0 на Δ трансформатора Т2 [для прямой последовательности фазовый поворот составляет 30° , для обратной (-30°)], составляют:

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{1(16)} e^{j30^\circ} + \mathbf{I}_{2(16)} e^{-j30^\circ} = 0,531 e^{j30^\circ} - 0,423 e^{-j30^\circ} = 0,486 e^{j79^\circ};$$

$$\mathbf{I}_b = a^2 \mathbf{I}_{1(16)} e^{j30^\circ} + a \mathbf{I}_{2(16)} e^{-j30^\circ} = 0,531 e^{j270^\circ} - 0,423 e^{90^\circ} = 0,954 e^{-90^\circ};$$

$$\mathbf{I}_c = a \mathbf{I}_{1(16)} e^{j30^\circ} + a^2 \mathbf{I}_{2(16)} e^{-j30^\circ} = 0,531 e^{j150^\circ} - 0,423 e^{j210^\circ} = 0,486 e^{j101^\circ};$$

$$\mathbf{U}_a = 0,854 e^{j120^\circ} + 0,216 e^{j60^\circ} = 0,98 e^{110^\circ};$$

$$\mathbf{U}_b = 0,854 e^{j360^\circ} + 0,216 e^{j180^\circ} = 0,638;$$

$$\mathbf{U}_c = 0,854 e^{j240^\circ} + 0,216 e^{j300^\circ} = 0,98 e^{-j110^\circ}.$$

Однофазное короткое замыкание

Находим симметричные составляющие токов и напряжений фазы А в месте короткого замыкания:

$$\mathbf{I}_{K1} = \mathbf{I}_{K2} = \mathbf{I}_{K0} = \frac{\mathbf{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})} = \frac{j1,0355}{j(2 \cdot 0,33 + 0,425)} = 0,954;$$

$$\mathbf{U}_{K1} = \mathbf{I}_{K1} j(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) = j0,954 \cdot (0,33 + 0,425) = j0,72;$$

$$\mathbf{U}_{K2} = -\mathbf{I}_{K2} jx_{2\Sigma} = -j0,954 \cdot 0,33 = -j0,315;$$

$$\mathbf{U}_{K0} = -\mathbf{I}_{K0} jx_{0\Sigma} = -j0,954 \cdot 0,425 = -j0,405.$$

Эти показатели позволяют определить фазные токи и напряжения в месте КЗ:

$$\mathbf{I}_{KA} = 3\mathbf{I}_{K1} = 2,862, \quad \mathbf{I}_{KB} = \mathbf{I}_{KC} = 0;$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{KA} &= 0, & \mathbf{U}_{KB} &= a^2 \mathbf{U}_{K1} + a \mathbf{U}_{K2} + \mathbf{U}_{K0} = \\ &= 0,72 e^{j330^\circ} - 0,315 e^{j210^\circ} - 0,405 e^{j90^\circ} = 1,083 e^{-j34^\circ}; \end{aligned}$$

$$\mathbf{U}_{KC} = 1,083 e^{j214^\circ}.$$

Ударный ток при $K_y = 1,72$ (см. $K^{(3)}$) составляет

$$i_y = \sqrt{2} I_{KA} K_y I_{63} = \sqrt{2} \cdot 2,862 \cdot 1,72 \cdot 2,51 = 17,47 \text{ кА.}$$

Имеем симметричные составляющие токов в линии $L2$ (ветвь 8):

$$\mathbf{I}_{1(8)} = \frac{\mathbf{E}_7 - \mathbf{U}_{K1}}{jx_{23}} = \frac{j(1,036 - 0,72)}{j0,35} = 0,903;$$

$$\mathbf{I}_{2(8)} = \frac{0 - \mathbf{U}_{K2}}{jx_{23}} = \frac{j0,315}{j0,35} = 0,9;$$

$$\mathbf{I}_{0(8)} = \frac{0 - \mathbf{U}_{K0}}{jx_{27}} = \frac{j0,405}{j0,554} = 0,73,$$

или $\mathbf{I}_{0(8)} = c_8 \mathbf{I}_{K0} = 0,767 \cdot 0,954 = 0,73$.

Фазные токи в линии $L2$:

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_{1(8)} + \mathbf{I}_{2(8)} + \mathbf{I}_{0(8)} = 0,903 + 0,9 + 0,73 = 2,533;$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_B = \mathbf{I}_C &= \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{1(8)} + \mathbf{a} \mathbf{I}_{2(8)} + \mathbf{I}_{0(8)} = \\ &= 0,903 e^{j240^\circ} + 0,9 e^{j120^\circ} + 0,73 = 0,17 e^{j180^\circ}. \end{aligned}$$

Находим ток прямой последовательности от синхронных и асинхронных двигателей

$$\mathbf{I}_{1(7)} = \mathbf{I}_{K1} - \mathbf{I}_{1(8)} = 0,954 - 0,903 = 0,051$$

и их вклад в суммарный ток короткого замыкания

$$\frac{3I_{1(7)}}{3I_{K1}} 100\% = \frac{3 \cdot 0,051}{3 \cdot 0,954} \cdot 100\% = 5,3\%.$$

Симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательностей в генераторах (элемент 16 рис. 7.17, *a*) без учета фазового сдвига в Т2:

$$\mathbf{I}_{1(16)} = \frac{\mathbf{I}_{1(8)} jx_{17} + \mathbf{E}_5 - \mathbf{E}_6}{j(x_{16} + x_{17})} = \frac{j(0,903 \cdot 0,333 + 1,126 - 1,0)}{j(0,832 + 0,333)} = 0,366;$$

$$\mathbf{I}_{2(16)} = \frac{\mathbf{I}_{2(8)} jx_{17}}{j(x_{16} + x_{17})} = \frac{j0,9 \cdot 0,333}{j1,165} = 0,257.$$

Находим симметричные составляющие напряжения генераторов (см. рис. 7.14, *б*, узел W), отгалкиваясь от потенциалов генераторов:

$$U_{\Gamma 1} = E_5 - I_{1(16)} j x_{10} = j(1,126 - 0,366 \cdot 0,512) = j0,938;$$

$$U_{\Gamma 2} = 0 - I_{2(16)} j x_{10} = -j0,257 \cdot 0,512 = -j0,132.$$

Находим фазные токи и напряжения генераторов с учетом перехода со Y_0 на Δ трансформатора Т2 [для прямой последовательности фазовый поворот составляет 30° , для обратной -30°]:

$$I_a = 0,366e^{j30^\circ} + 0,257e^{-j30^\circ} = 0,543e^{j5,8};$$

$$I_b = 0,366e^{j270^\circ} + 0,257e^{90^\circ} = 0,11e^{-j90^\circ};$$

$$I_c = 0,366e^{j150^\circ} + 0,257e^{j210^\circ} = 0,543e^{j174,2};$$

$$U_a = 0,938e^{j120^\circ} - 0,132e^{j60^\circ} = 0,881e^{j127^\circ};$$

$$U_b = 0,938e^{j360^\circ} - 0,132e^{j180^\circ} = 1,07;$$

$$U_c = 0,938e^{j240^\circ} - 0,132e^{j300^\circ} = 0,881e^{-j127^\circ}.$$

Ток в нейтрали трансформатора Т2

$$I_N = 3I_{0(9)}I_{63} = 3c_9I_{K0}I_{63} = 3 \cdot 0,515 \cdot 0,954 \cdot 2,51 = 3,7 \text{ кА},$$

и автотрансформатора АТ1

$$\begin{aligned} I_N &= 3(I_{0(12)}I_{63} - I_{0(13)}I_{64}) = 3I_{K0}(c_{12}I_{63} - c_{13}I_{64}) = \\ &= 3 \cdot 0,954 \cdot (0,252 \cdot 2,51 - 0,134 \cdot 1,12) = 1,38 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Двухфазное замыкание на землю

Рассчитываем симметричные составляющие токов и напряжений особой фазы А в месте короткого замыкания:

$$I_{K1} = \frac{E_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_\Delta)} = \frac{j1,0355}{j(0,33 + 0,186)} = 2,$$

где $x_\Delta = x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma} = 0,33 // 0,425 = 0,186$;

$$I_{K2} = -I_{K1} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = -\frac{2 \cdot 0,425}{0,33 + 0,425} = -1,126;$$

$$I_{K0} = -I_{K1} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = -\frac{2 \cdot 0,33}{0,755} = -0,874;$$

$$U_{K1} = U_{K2} = U_{K0} = I_{K1} jx_{\Delta} = j2 \cdot 0,186 = j0,372.$$

Фазные токи и напряжения в месте короткого замыкания:

$$|I_{KB}| = |I_{KC}| = mI_{K1} = 1,5 \cdot 2 = 3, \quad I_{KA} = 0,$$

где $m = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}} = 1,5.$

$$U_{KA} = 3U_{K1} = 3 \cdot j0,372 = j1,116, \quad U_{KB} = U_{KC} = 0.$$

Ударный ток при $K_y = 1,72$

$$i_y = \sqrt{2} I_{KB} K_y I_{63} = \sqrt{2} \cdot 3 \cdot 1,72 \cdot 2,51 = 18,3 \text{ кА.}$$

Симметричные составляющие токов в линии $L2$ (ветвь 8):

$$I_{1(8)} = \frac{E_7 - U_{K1}}{jx_{23}} = \frac{j(1,036 - 0,372)}{j0,35} = 1,897;$$

$$I_{2(8)} = \frac{-U_{K2}}{jx_{23}} = \frac{-j0,372}{j0,35} = -1,063;$$

$$I_{0(8)} = \frac{-U_{K0}}{jx_{27}} = \frac{-j0,372}{j0,554} = -0,671$$

или $I_{0(8)} = c_8 I_{K0} = 0,767 \cdot (-0,874) = -0,67.$

Фазные токи в линии $L2$:

$$I_A = 1,897 - 1,063 - 0,671 = 0,163;$$

$$I_B = 1,897 e^{j240^\circ} - 1,063 e^{120^\circ} - 0,671 = 2,785 e^{-j113^\circ};$$

$$I_C = 1,897 e^{j120^\circ} - 1,063 e^{j240^\circ} - 0,671 = 2,785 e^{j113^\circ}.$$

Ток прямой последовательности от двигателей

$$I_{1(7)} = I_{K1} - I_{1(8)} = 2 - 1,897 = 0,103,$$

и вклад двигательной нагрузки в суммарный ток короткого замыкания

$$\frac{mI_{1(7)}}{mI_{K1}} 100 \% = \frac{1,5 \cdot 0,103}{1,5 \cdot 2,0} \cdot 100 \% = 5,15 \%.$$

Симметричные составляющие токов в генераторах (элемент 16, см. рис. 7.17, а) без учета фазового сдвига в Т2 (расчетные выражения приведены в предшествующем пункте для $K^{(1)}$):

$$\mathbf{I}_{1(16)} = \frac{1,897 \cdot 0,333 + 1,126 - 1}{0,832 + 0,333} = 0,65; \quad \mathbf{I}_{2(16)} = -0,304.$$

Вычисляем симметричные составляющие напряжения генераторов (см. рис. 7.14, б, узел W), используя потенциалы генераторов в схемах прямой и обратной последовательностей:

$$\mathbf{U}_{\Gamma 1} = \mathbf{E}_5 - \mathbf{I}_{1(16)} jx_{10} = j(1,126 - 0,65 \cdot 0,512) = j0,793;$$

$$\mathbf{U}_{\Gamma 2} = 0 - \mathbf{I}_{2(16)} jx_{10} = j0,304 \cdot 0,512 = j0,156.$$

Фазные токи и напряжения генераторов, с учетом трансформации со стороны Y_0 на Δ в трансформаторе Т2:

$$\mathbf{I}_a = 0,65e^{j30^\circ} - 0,304e^{-j30^\circ} = 0,563e^{j58^\circ};$$

$$\mathbf{I}_b = 0,65e^{270^\circ} - 0,304e^{j90^\circ} = 0,954e^{-j90^\circ};$$

$$\mathbf{I}_c = 0,65e^{j150^\circ} - 0,304e^{j210^\circ} = 0,563e^{j122^\circ};$$

$$\mathbf{U}_a = 0,793e^{j120^\circ} + 0,156e^{j60^\circ} = 0,88e^{j111^\circ};$$

$$\mathbf{U}_b = 0,793e^{j360^\circ} + 0,156e^{j180^\circ} = 0,637;$$

$$\mathbf{U}_c = 0,793e^{j240^\circ} + 0,156e^{j300^\circ} = 0,88e^{-j111^\circ}.$$

Ток в нейтрали Т2, приведенный к $U_{63} = 230$ кВ,

$$\mathbf{I}_N = 3\mathbf{I}_{0(9)}I_{63} = 3c_9\mathbf{I}_{K0}I_{63} = 3 \cdot 0,515 \cdot 0,874 \cdot 2,51 = 3,39 \text{ кА},$$

и ток автотрансформатора АТ1

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_N &= 3(\mathbf{I}_{0(12)}I_{63} - \mathbf{I}_{0(13)}I_{64}) = 3\mathbf{I}_{K0}(c_{12}I_{63} - c_{13}I_{64}) = \\ &= 3 \cdot 0,874 \cdot (0,252 \cdot 2,51 - 0,134 \cdot 1,12) = 1,265 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Определим линейные напряжения на шинах генераторов:

$$\mathbf{U}_{ab} = \mathbf{U}_a - \mathbf{U}_b = 0,88e^{j111^\circ} - 0,637 = 1,258e^{j139,2^\circ};$$

$$\mathbf{U}_{ca} = \mathbf{U}_c - \mathbf{U}_a = 0,88e^{-j111^\circ} - 0,88e^{111^\circ} = 1,643e^{-j90^\circ};$$

$$\mathbf{U}_{bc} = \mathbf{U}_b - \mathbf{U}_c = 0,637 - 0,88e^{-j111^\circ} = 1,258e^{j40,8^\circ}.$$

Векторные диаграммы напряжений и токов (U , I) для рассчитанных режимов коротких замыканий представлены на рис. 7.18.

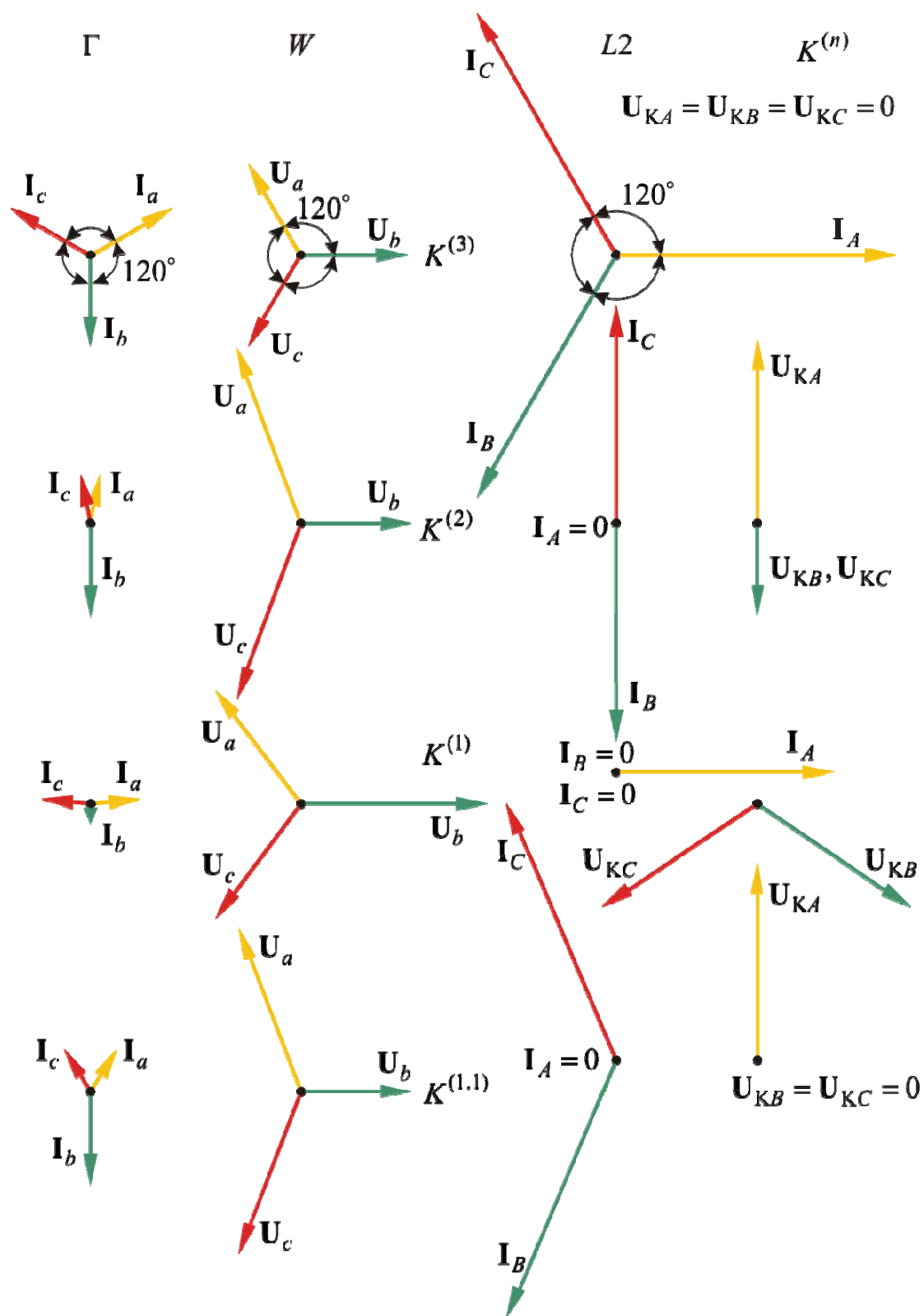


Рис. 7.18. Векторные диаграммы токов и напряжений при различных видах короткого замыкания: Γ – ветвь генератора; W – шины генераторов; $L2$ – воздушная линия; $K^{(n)}$ – место КЗ (к задаче 7.2)

Для перехода к именованным единицам токи необходимо умножить на I_6 , напряжения – на $U_6/\sqrt{3}$ соответствующих ступеней трансформации.

Как отмечалось ранее (разд. 7.6), для условий $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = x_{0\Sigma}$ токи при трехфазном, однофазном и двухфазном коротких замыканиях на землю численно одинаковы. В данном примере $x_{0\Sigma} = 0,425$ и больше, $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = 0,33$, что привело к снижению токов несимметричных КЗ по сравнению с трехфазным. Для рассматриваемых видов КЗ токи по месту короткого замыкания находятся в отношении:

$$I^{(3)} : I^{(1.1)} : I^{(1)} : I^{(2)} = 1 : 0,955 : 0,911 : 0,863.$$

Увеличение результирующего сопротивления нулевой последовательности, по сравнению с прямой, обусловлено в основном воздушными ЛЭП. Векторные диаграммы построены для токов в линии $L2$ и в цепи генераторов и для напряжений на шинах генераторов и в узле КЗ. Для сопоставимости результатов величины представлены в относительных единицах; их масштабы для всех видов замыкания одинаковы. Особой фазой принята фаза A .

Контрольные вопросы

1. Что положено в основу создания комплексных схем замещения?
2. Какие соотношения для токов позволяют сформулировать правило эквивалентности прямой последовательности?
3. Что позволяет применять методы расчета токов $K^{(3)}$ к вычислению несимметричных режимов КЗ?
4. Как записывается обобщенное расчетное выражение для периодического тока произвольного несимметричного КЗ?
5. Как записываются выражения для дополнительных сопротивлений $x_{\Delta}^{(n)}$ и коэффициентов $m^{(n)}$ для различных видов поперечной несимметрии?
6. По каким обобщенным выражениям рассчитываются симметричные составляющие напряжений в месте короткого замыкания?
7. Как изменяются симметричные составляющие остаточных напряжений по мере удаления от точки несимметричного замыкания?
8. Для каких целей используются комплексные коэффициенты трансформации?
9. При каких условиях токи несимметричных коротких замыканий больше тока трехфазного КЗ?

Глава 8

ОДНОКРАТНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ И СЛОЖНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ

8.1. Общие замечания

Продольная несимметрия возникает в электрической системе при обрыве одной или двух фаз, а также при включении в фазы неодинаковых сопротивлений.

Продольная несимметрия может быть следствием поперечной несимметрии. Воздушные линии электропередачи высокого и сверхвысокого класса напряжения снабжены пофазным управлением. В этих условиях, при возникновении несимметричного короткого замыкания на ВЛ, релейная защита отключает поврежденную фазу, а при одновременном повреждении двух фаз – обе фазы, оставляя в работе «здоровые» фазы. При одноцепных линиях электропередачи этим избегается потеря связи между отдельными станциями. В условиях эксплуатации пофазное отключение производится не только в аварийных ситуациях, но и в целях проведения ремонтных, профилактических и испытательных работ.

Исследование режимов при продольной несимметрии также удобно вести на основе метода симметричных составляющих. Для этого предполагают, что несимметрия имеет местный (сосредоточенный) характер, а вся система продолжает оставаться конструктивно симметричной.

Основные уравнения падений напряжения в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей, составленные для симметричной части схемы (рис. 8.1), имеют вид, аналогичный уравнениям (6.11)–(6.13):

$$\Delta U_{L1} = E_{1\Sigma} - I_{L1} j x_{L1\Sigma}; \quad (8.1)$$

$$\Delta U_{L2} = 0 - I_{L2} j x_{L2\Sigma}; \quad (8.2)$$

$$\Delta U_{L0} = 0 - I_{L0} j x_{L0\Sigma}, \quad (8.3)$$

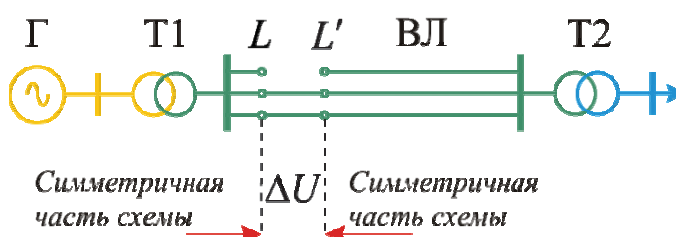


Рис. 8.1. Продольная несимметрия

где ΔU_{L1} , ΔU_{L2} , ΔU_{L0} – симметричные составляющие падения напряжения особой фазы А на несимметричном участке системы; $x_{L1\Sigma}$, $x_{L2\Sigma}$, $x_{L0\Sigma}$ – результирующие реактивности схем соответствующих последо-

вательностей относительно клемм продольной несимметрии $L - L'$. Индекс L является символом продольной несимметрии.

Дополнительные связи между симметричными составляющими токов и падений напряжений устанавливаются из граничных условий рассматриваемой продольной несимметрии, подобно тому, как это имело место при поперечной несимметрии.

Ниже рассматриваются основные расчетные выражения, соответствующие: а) разрыву одной или двух фаз; б) включению в одну или две фазы дополнительных сопротивлений.

8.2. Разрыв одной фазы

Основываясь на рис. 8.2, а, запишем граничные условия в месте разрыва одной фазы:

$$\mathbf{I}_{LA} = 0; \quad (8.4)$$

$$\Delta \mathbf{U}_{LB} = 0; \quad (8.5)$$

$$\Delta \mathbf{U}_{LC} = 0. \quad (8.6)$$

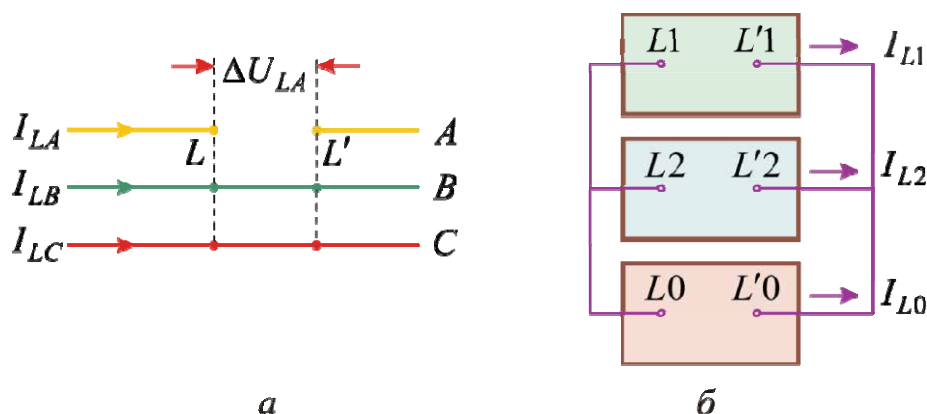


Рис. 8.2. Разрыв одной фазы: а – место несимметрии; б – комплексная схема замещения

При разложении падений напряжения на симметричные составляющие, с учетом условий (8.5), (8.6), получаем следующие равенства:

$$\Delta \mathbf{U}_{La1} = \Delta \mathbf{U}_{La2} = \Delta \mathbf{U}_{La0} = \frac{1}{3} \Delta \mathbf{U}_{LA}. \quad (8.7)$$

Запишем условие (8.4) в развернутой форме:

$$\mathbf{I}_{La1} + \mathbf{I}_{La2} + \mathbf{I}_{L0} = 0. \quad (8.8)$$

Из уравнений второго закона Кирхгофа [(8.2) и (8.3)], с учетом соотношения (8.7), получаем выражения для симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей:

$$\mathbf{I}_{La2} = -\frac{\Delta \mathbf{U}_{La1}}{jx_{L2\Sigma}}; \quad (8.9)$$

$$\mathbf{I}_{L0} = -\frac{\Delta \mathbf{U}_{La1}}{jx_{L0\Sigma}}. \quad (8.10)$$

Подставляя найденные выражения для \mathbf{I}_{La2} и \mathbf{I}_{L0} в уравнение граничного условия (8.8), получаем расчетную формулу для падения напряжения прямой последовательности

$$\Delta \mathbf{U}_{La1} = \mathbf{I}_{La1} jx_{\Delta L}, \quad (8.11)$$

где $x_{\Delta L} = x_{L2\Sigma} // x_{L0\Sigma}$.

На основе уравнения (8.1) с учетом соотношения (8.11) определяем ток прямой последовательности

$$\mathbf{I}_{La1} = \frac{\mathbf{E}_{1\Sigma}}{j(x_{L1\Sigma} + x_{\Delta L})}. \quad (8.12)$$

Подстановка $\Delta \mathbf{U}_{La1}$, согласно (8.11), поочередно в (8.9) и в (8.10) позволяет получить расчетные формулы для токов обратной и нулевой последовательностей:

$$\mathbf{I}_{La2} = -\mathbf{I}_{La1} \frac{x_{L0\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} = -\mathbf{I}_{La1} \frac{x_{\Delta L}}{x_{L2\Sigma}}; \quad (8.13)$$

$$\mathbf{I}_{L0} = -\mathbf{I}_{La1} \frac{x_{L2\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} = -\mathbf{I}_{La1} \frac{x_{\Delta L}}{x_{L0\Sigma}}. \quad (8.14)$$

Падение напряжения в месте разрыва фазы A , в соответствии с (8.7), определится так:

$$\Delta \mathbf{U}_{LA} = 3\Delta \mathbf{U}_{La1} = 3\mathbf{I}_{La1} jx_{\Delta L}. \quad (8.15)$$

Расчет фазных напряжений в точках разрыва осуществляется следующим образом. По схемам отдельных последовательностей находятся симметричные составляющие напряжения относительно одной из клемм несимметрии (L'). Прибавив к последним падения напряжения ΔU_{La1} , ΔU_{La2} , ΔU_{La0} , находят симметричные составляющие напряжений с другой стороны продольной несимметрии (L). Переход к фазным величинам напряжений производится известным способом.

Как следует из выражений (8.7) и (8.12)–(8.14), соотношения для симметричных составляющих падений напряжений и токов по месту

несимметрии при разрыве одной фазы ($L^{(1)}$) совершенно идентичны соответствующим выражениям при двухфазном коротком замыкании на землю (см. разд. 7.4). Структурная комплексная схема замещения при разрыве одной фазы представлена на рис. 8.2, б.

Для иллюстрации на рис. 8.3 приведены векторные диаграммы напряжений и токов. По краям разрыва отличаются только напряжения поврежденной фазы (A); напряжения здоровых фаз (B, C) по краям разрыва равны между собой.

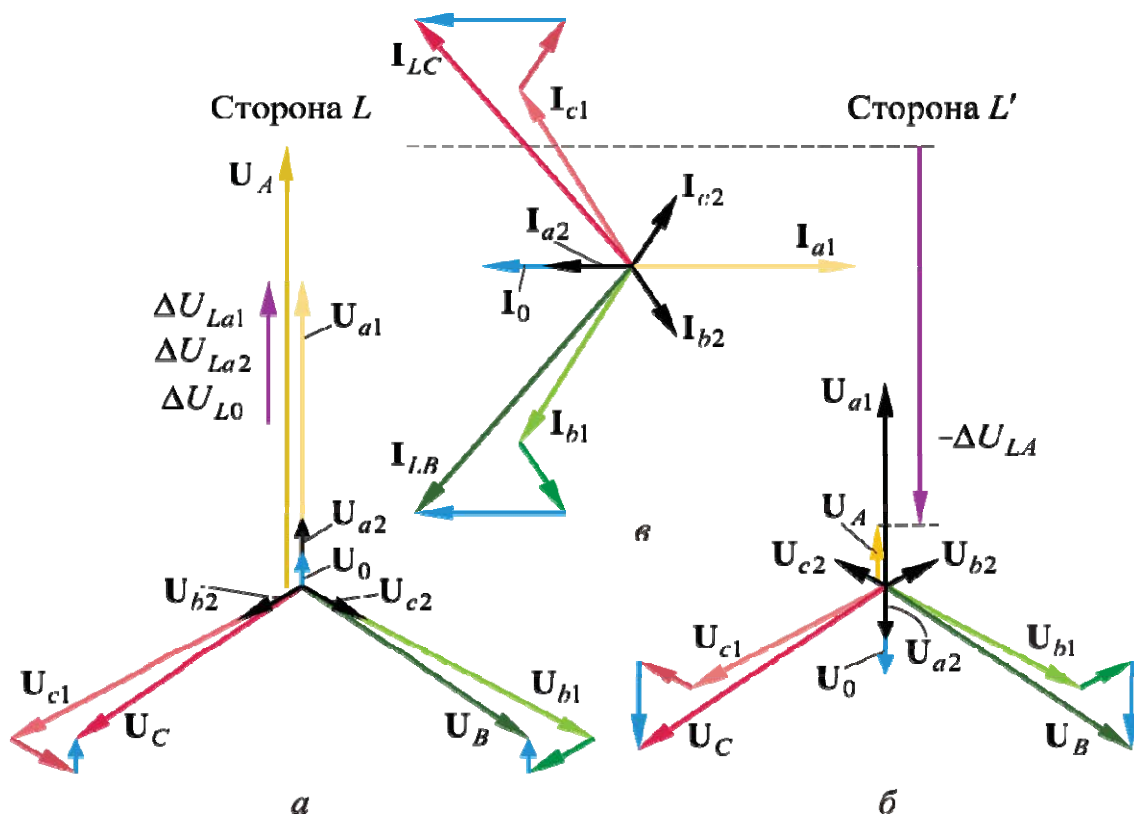


Рис. 8.3. Векторные диаграммы при разрыве одной фазы:
а, б – напряжений в точках разрыва; в – токов в месте разрыва

Токи в неповрежденных фазах выражаются через симметричные составляющие тока фазы A следующим образом:

$$\mathbf{I}_{LB} = \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{La1} + \mathbf{a} \mathbf{I}_{La2} + \mathbf{I}_{L0} = \left(\mathbf{a}^2 - \frac{x_{L2\Sigma} + \mathbf{a} x_{L0\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} \right) \mathbf{I}_{La1}; \quad (8.16)$$

$$\mathbf{I}_{LC} = \left(\mathbf{a} - \frac{x_{L2\Sigma} + \mathbf{a}^2 x_{L0\Sigma}}{x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}} \right) \mathbf{I}_{La1}, \quad (8.17)$$

$$\text{или по модулю } |I_{LB}| = |I_{LC}| = m^{(1.1)} I_{La1}, \quad (8.18)$$

где $m^{(1.1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{L2\Sigma} x_{L0\Sigma}}{(x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma})^2}}$.

Этот коэффициент определяется реактивностями $x_{L2\Sigma}$ и $x_{L0\Sigma}$ и, в зависимости от соотношения между ними, находится в пределах

$$1,5 \leq m^{(1.1)} \leq \sqrt{3}.$$

8.3. Разрыв двух фаз

Граничные соотношения в месте разрыва двух фаз в соответствии с условиями, отраженными на рис. 8.4, а, запишутся так:

$$\Delta U_{LA} = 0; \quad (8.19)$$

$$I_{LB} = 0; \quad (8.20)$$

$$I_{LC} = 0. \quad (8.21)$$

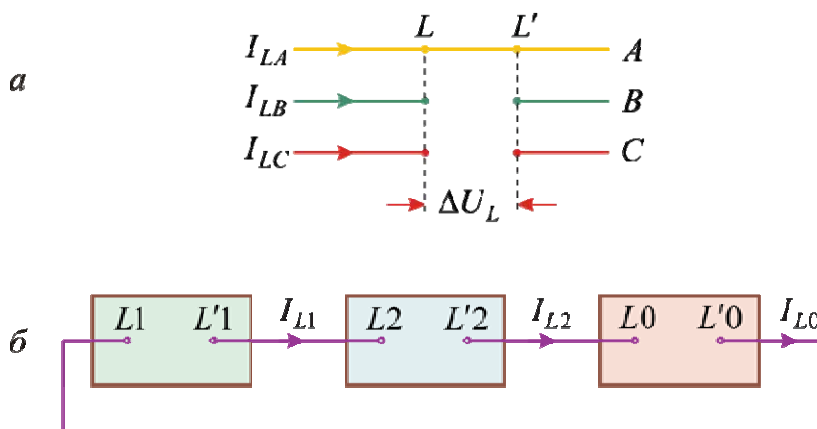


Рис. 8.4. Разрыв двух фаз: а – место несимметрии; б – комплексная схема замещения

Условия (8.20), (8.21) для $L^{(2)}$ приводят к следующим соотношениям между симметричными составляющими токов:

$$I_{La1} = I_{La2} = I_{L0} = \frac{1}{3} I_{LA}. \quad (8.22)$$

Запишем условие (8.19) через симметричные составляющие:

$$\Delta U_{La1} + \Delta U_{La2} + \Delta U_{L0} = 0. \quad (8.23)$$

Получим расчетное выражение для тока прямой последовательности. Для этого симметричные составляющие падения напряжения из соотношений (8.1)–(8.3) подставим в (8.23) и учтем связь между симметричными составляющими токов согласно (8.22). В результате имеем

$$I_{La1} = \frac{E_{1\Sigma}}{j(x_{L1\Sigma} + x_{\Delta L})}, \quad (8.24)$$

где $x_{\Delta L} = x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma}$.

Ток в неповрежденной фазе A , согласно условию (8.22), равен утроенному току прямой последовательности:

$$\mathbf{I}_{LA} = 3\mathbf{I}_{La1}. \quad (8.25)$$

Симметричные составляющие падения напряжений в месте разрыва целесообразно рассчитывать по следующим выражениям:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \mathbf{U}_{La1} &= \mathbf{I}_{La1} j^x \Delta L; \\ \Delta \mathbf{U}_{La2} &= -\mathbf{I}_{La1} j^x L_{2\Sigma}; \\ \Delta \mathbf{U}_{L0} &= -\mathbf{I}_{La1} j^x L_{0\Sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (8.26)$$

Векторные диаграммы напряжений и токов для условий разрыва двух фаз (B и C) приведены на рис. 8.5. Для здоровой фазы A напряжения по обоим концам разрыва одинаковы; для поврежденных фаз B и C они отличаются. Симметричные составляющие падения напряжений особой фазы A подчиняются соотношениям (8.26) и приведены слева от векторной диаграммы напряжений стороны L (рис. 8.5).

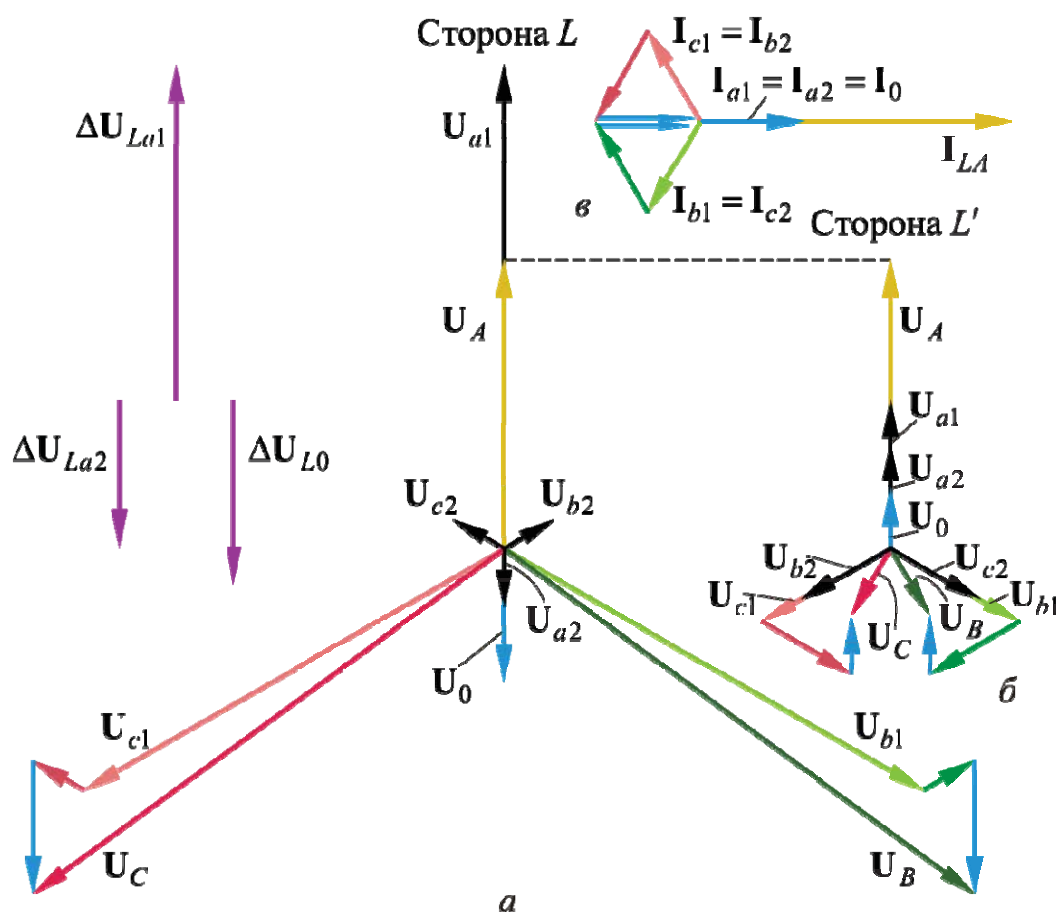


Рис. 8.5. Векторные диаграммы при разрыве двух фаз:
а, б – напряжений в точках разрыва; в – токов в месте разрыва

Отметим, что все расчетные выражения для симметричных составляющих токов и падений напряжений для разрыва двух фаз ($L^{(2)}$) полностью идентичны случаю однофазного короткого замыкания на землю ($K^{(1)}$), что находит свое подтверждение и в комплексной схеме замещения (см. рис. 8.4, б).

8.4 Несимметрия от включения сопротивлений

Возьмем продольную несимметрию, обусловленную включением в одну или две фазы сопротивления Z . Такие условия могут возникнуть при неодновременном расхождении контактов выключателя, когда отключение сопровождается дуговыми явлениями.

Граничные условия (рис. 8.6) для рассматриваемых случаев имеют следующий вид:

– при включении сопротивления в одну фазу (A)

$$\Delta U_{LA} = Z I_{LA}, \Delta U_{LB} = 0, \Delta U_{LC} = 0;$$

– при включении сопротивления в две фазы (B, C)

$$\Delta U_{LA} = 0, \Delta U_{LB} = Z I_{LB}, \Delta U_{LC} = Z I_{LC}.$$

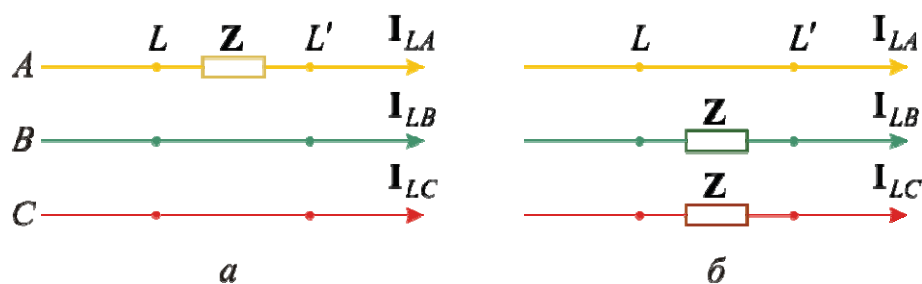


Рис. 8.6. Несимметрия от включения сопротивлений:
а – в одну фазу; б – в две фазы

Совместное решение уравнений (8.1)–(8.3), с учетом соответствующих граничных условий, аналогично тому, как это делалось ранее. В результате получаем расчетные выражения для всех симметричных составляющих токов и падений напряжений, которые сведены в табл. 8.1.

Отметим, что разрыв одной или двух фаз является частным случаем рассматриваемой несимметрии: расчетные уравнения для случая разрыва можно получить из выражений, приведенных в табл. 8.1, полагая $Z = \infty$.

На рис. 8.7 представлены комплексные схемы замещения, соответствующие данному случаю несимметрии.

Таблица 8.1

Симметричные составляющие токов и падений напряжения
в месте однократной продольной несимметрии

Определяемые величины	При включении сопротивления \mathbf{Z}	
	в одну фазу $[L^{(1)}]$	В две фазы $[L^{(2)}]$
\mathbf{I}_{La1}	$\frac{\mathbf{E}_{1\Sigma}}{jx_{L1\Sigma} + \mathbf{Z}_{\Delta L}^{(1)}}$	$\frac{\mathbf{E}_{1\Sigma}}{jx_{L1\Sigma} + \mathbf{Z}_{\Delta L}^{(2)}}$
$\mathbf{Z}_{\Delta L}^{(n)}$	$\frac{\mathbf{Z}}{3} // jx_{L2\Sigma} // jx_{L0\Sigma}$	$\mathbf{Z} // [\mathbf{Z} // jx_{L2\Sigma} + \mathbf{Z} // jx_{L0\Sigma}]$
\mathbf{I}_{La2}	$-\frac{\mathbf{Z}_{\Delta L}^{(1)}}{jx_{L2\Sigma}} \mathbf{I}_{La1}$	$\frac{-\mathbf{Z}_{\Delta L}^{(2)}}{\mathbf{Z} + jx_{L2\Sigma}} \mathbf{I}_{La1}$
\mathbf{I}_{L0}	$-\frac{\mathbf{Z}_{\Delta L}^{(1)}}{jx_{L0\Sigma}} \mathbf{I}_{La1}$	$\frac{-\mathbf{Z}_{\Delta L}^{(2)}}{\mathbf{Z} + jx_{L0\Sigma}} \mathbf{I}_{La1}$
$\Delta \mathbf{U}_{La1}$	$\mathbf{Z}_{\Delta L}^{(1)} \mathbf{I}_{La1}$	$\mathbf{Z}_{\Delta L}^{(2)} \mathbf{I}_{La1}$
$\Delta \mathbf{U}_{La2}$	$\Delta \mathbf{U}_{La1}$	$\frac{jx_{L2\Sigma}(\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_{\Delta L}^{(2)})}{\mathbf{Z} + jx_{L2\Sigma}} \mathbf{I}_{La1}$
$\Delta \mathbf{U}_{L0}$	$\Delta \mathbf{U}_{La1}$	$\frac{jx_{L0\Sigma}(\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_{\Delta L}^{(2)})}{\mathbf{Z} + jx_{L0\Sigma}} \mathbf{I}_{La1}$

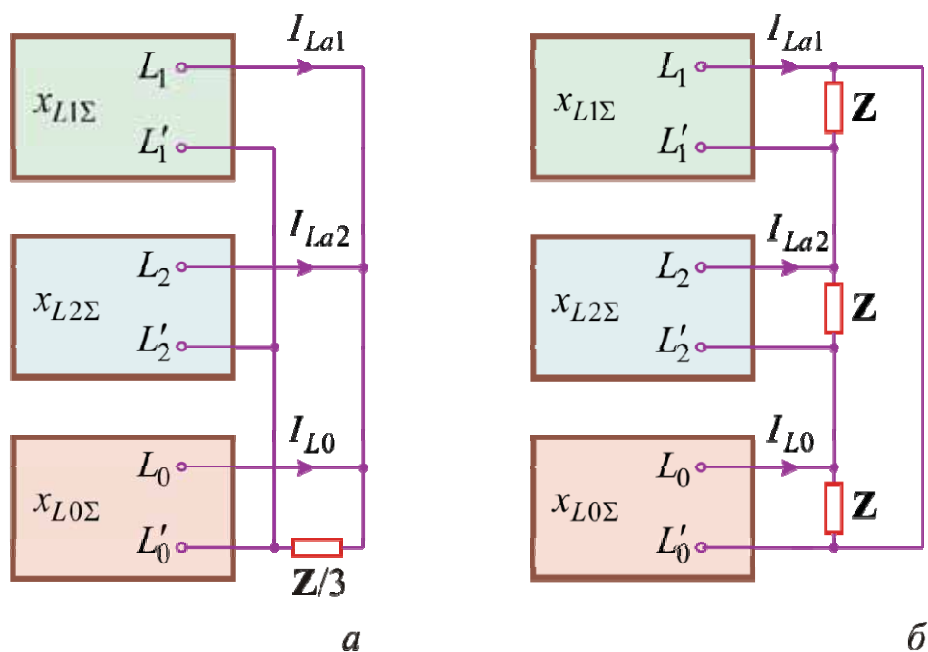


Рис. 8.7. Комплексные схемы замещения:
 а – при наличии сопротивления в одной фазе;
 б – при наличии одинаковых сопротивлений в двух фазах

Пример 8.1

Рассматривается однократная продольная несимметрия и комплексные коэффициенты трансформации.

В схеме (см. рис. 8.8, а) осуществляется включение генератора на параллельную работу с «системой». Считая, что такое включение производится одновременно:

- тремя фазами выключателя В;
- то же двумя фазами;
- то же одной фазой,

определить начальные значения сверхпереходного тока в цепи генератора для наиболее тяжелых условий.

Исходные данные

Генератор Г: 176,5 МВА, 18 кВ, $x_d'' = 0,21$, $x_2 = 0,255$.

Трансформатор Т: 160 МВА, 242/18 кВ, $U_K = 12\%$; Y_0/Δ -11.

Автотрансформатор АТ: 200 МВА, 525/220/10,5 кВ

$U_{K(B-C)} = 10\%$, $U_{K(B-H)} = 24\%$, $U_{K(C-H)} = 12\%$, $Y_0/Y_0/\Delta$.

Линия L: 145 км, $x_1 = 0,425$ Ом/км, $x_0 = 1,31$ Ом/км.

Система С: источник неизменного напряжения ($x_1 = x_2 = x_0 = 0$);
 $U_C = 510$ кВ.

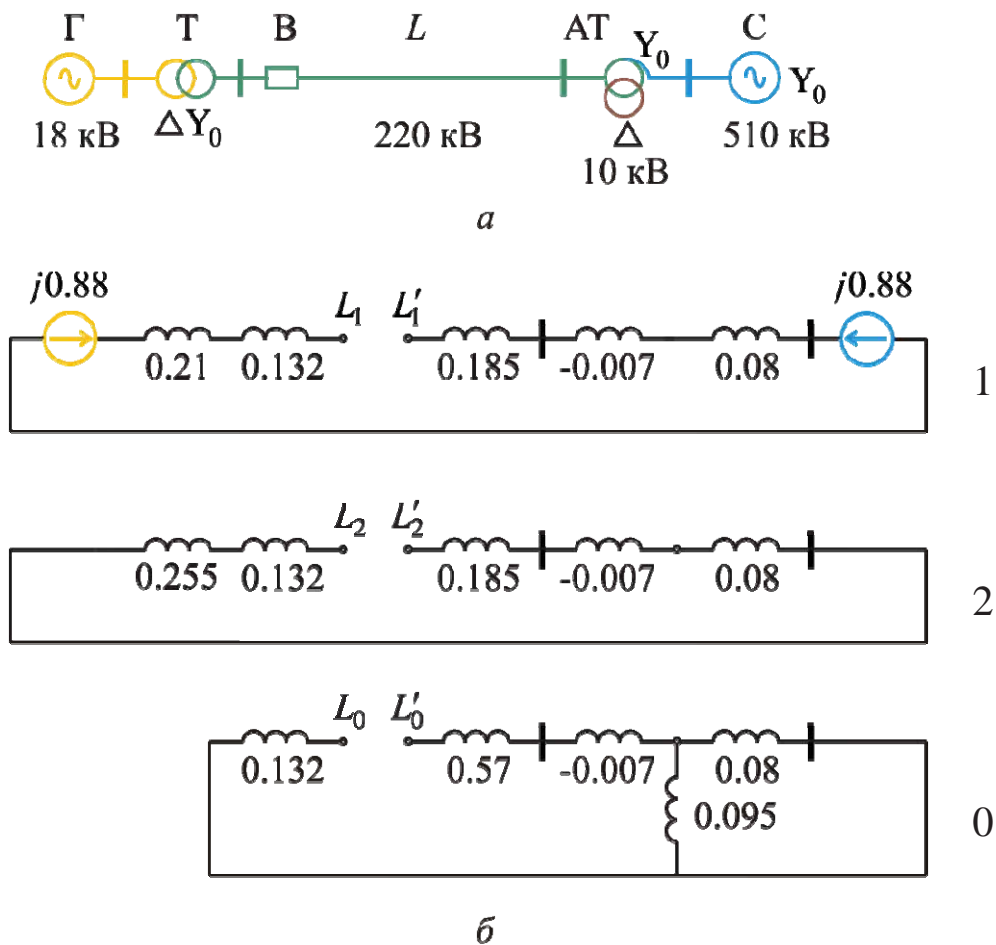


Рис. 8.8. К примеру 8.1: а – исходная схема; б – схемы замещения прямой (1), обратной (2) и нулевой (0) последовательностей

Решение. Расчеты осуществляем в относительных единицах при следующих базисных условиях:

$$S_{\text{б}} = 176,5 \text{ МВА}, U_{\text{б}1} = 18 \text{ кВ}.$$

$$\text{Тогда } U_{\text{б}2} = 18 \frac{242}{18} = 242 \text{ кВ}, U_{\text{б}3} = 242 \frac{525}{220} = 577,5 \text{ кВ}.$$

1. Расчет параметров схем замещения.

На рис. 8.8, б приведены схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей с реактивностями в относительных единицах при выбранных базисных условиях. Результирующие сопротивления указанных схем относительно места разрыва составляют:

$$x_{L1\Sigma} = 0,21 + 0,132 + 0,185 - 0,007 + 0,08 = 0,6;$$

$$x_{L2\Sigma} = 0,255 + 0,132 + 0,185 - 0,007 + 0,08 = 0,645;$$

$$x_{L0\Sigma} = 0,132 + 0,57 - 0,007 + 0,08 // 0,095 = 0,74.$$

Считаем, что при включении генератора на параллельную работу напряжение на выключателе со стороны системы равно напряжению системы, которое в о. е. составляет

$$U_C = \frac{j510}{577,5} = j0,88.$$

В режиме холостого хода сверхпереходная ЭДС генератора равна напряжению на выключателе, т. е. $E'' = j0,88$.

Наиболее тяжелые условия по току имеют место, когда напряжения включаемых источников находятся в противофазе. При этом результирующая ЭДС схемы прямой последовательности относительно места разрыва составит

$$E_{1\Sigma} = E'' - U_C = j0,88 - (-j0,88) = j1,76.$$

2. Расчет токов при включении источников питания (генератора и системы) на параллельную работу.

2.1. Одновременное включение трех фаз представляет симметричный режим:

$$I_L^{(3)} = \frac{E_{1\Sigma}}{jx_{L1\Sigma}} = \frac{j1,76}{j0,6} = 2,93.$$

2.2. При включении двух фаз (разрыв одной фазы) имеем

$$x_{\Delta L}^{(1)} = x_{L2\Sigma} // x_{L0\Sigma} = 0,645 // 0,74 = 0,345.$$

Рассчитываем симметричные составляющие тока прямой и обратной последовательностей по месту включения:

$$I_{L1} = \frac{E_{1\Sigma}}{j(x_{L1\Sigma} + x_{\Delta}^{(1)})} = \frac{1,76}{(0,6 + 0,345)} = 1,86;$$

$$I_{L2} = -I_{L1} \frac{x_{\Delta}^{(1)}}{x_{L2\Sigma}} = -1,86 \frac{0,345}{0,645} = -1.$$

Модуль сверхпереходного тока в здоровых фазах B и C по месту включения составляет

$$I_{LB}^{(1)} = I_{LC} = m^{(1)} I_{L1} = 1,5 \cdot 1,86 = 2,79,$$

где $m^{(1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{0,645 \cdot 0,74}{(0,645 + 0,74)^2}} = 1,5.$

Симметричные составляющие тока прямой и обратной последовательностей в цепи генератора (нулевая – отсутствует), с учетом перехо-

да через трансформатор со схемой соединения обмоток $Y_0 / \Delta - 11$, рассчитываются по выражениям:

$$\mathbf{I}_{\Gamma 1} = \mathbf{I}_{L1} e^{-j30^\circ \cdot 11} = 1,86 e^{-j330^\circ} = 1,86 e^{j30^\circ};$$

$$\mathbf{I}_{\Gamma 2} = \mathbf{I}_{L2} e^{j30^\circ \cdot 11} = 1 e^{j(180+330)^\circ} = 1 e^{j150^\circ}.$$

Наибольшего значения ток генератора достигает в фазе B , где токи $\mathbf{I}_{\Gamma 1}$ и $\mathbf{I}_{\Gamma 2}$ совпадают по фазе:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{\Gamma(B)}^{(1)} &= \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{\Gamma 1} + \mathbf{a} \mathbf{I}_{\Gamma 2} = 1,86 e^{j(240+30)^\circ} + 1 e^{j(120+150)^\circ} = \\ &= 1,86 e^{j270^\circ} + 1 e^{j270^\circ} = 2,86 e^{j270^\circ}. \end{aligned}$$

2.3. При включении только одной фазы (разрыв двух фаз) имеем следующие значения дополнительной реактивности и симметричных составляющих токов трех последовательностей:

$$x_{\Delta L}^{(2)} = x_{L2\Sigma} + x_{L0\Sigma} = (0,645 + 0,74) = 1,385;$$

$$\mathbf{I}_{L1} = \mathbf{I}_{L2} = \mathbf{I}_{L0} = \frac{j1,76}{j(0,6 + 1,385)} = 0,89$$

и модуль тока включившейся фазы A по месту несимметрии

$$I_{LA}^{(2)} = 3I_{L1} = 3 \cdot 0,89 = 2,67.$$

Симметричные составляющие тока прямой и обратной последовательностей в цепи генератора, с учетом перехода через трансформатор, составят:

$$\mathbf{I}_{\Gamma 1} = \mathbf{I}_{L1} e^{-j30^\circ \cdot 11} = 0,89 e^{j30^\circ}, \quad \mathbf{I}_{\Gamma 2} = \mathbf{I}_{L2} e^{-j30^\circ \cdot 11} = 0,89 e^{-j30^\circ}.$$

Наибольшей величины токи в цепи генератора достигают в фазах A и C , которые равны по модулю:

$$\mathbf{I}_{\Gamma(A)}^{(2)} = \mathbf{I}_{\Gamma(C)}^{(2)} = 0,89 e^{j30^\circ} + 0,89 e^{-j30^\circ} = 1,54;$$

ток фазы B равен нулю.

Искомые соотношения между наибольшими сверхпереходными токами при различных условиях включения составляют:

в цепи генератора

$$I_{\Gamma}^{(3)} : I_{\Gamma}^{(1)} : I_{\Gamma}^{(2)} = 2,93 : 2,86 : 1,54 = 1 : 0,98 : 0,53;$$

в линии L

$$I_L^{(3)} : I_L^{(1)} : I_L^{(2)} = 2,93 : 2,79 : 2,67 = 1 : 0,95 : 0,91.$$

Пример 8.2. Для схемы рис. 8.9, а при обрыве одной фазы в начале линии:

- определить токи неповрежденных фаз;
- построить эпюры распределения симметричных составляющих напряжений;
- рассчитать фазные напряжения в месте разрыва линии.

Исходные данные. Комплексная схема для рассматриваемого режима приведена на рис. 8.9, б, где все параметры выражены в относительных единицах при базисных условиях.

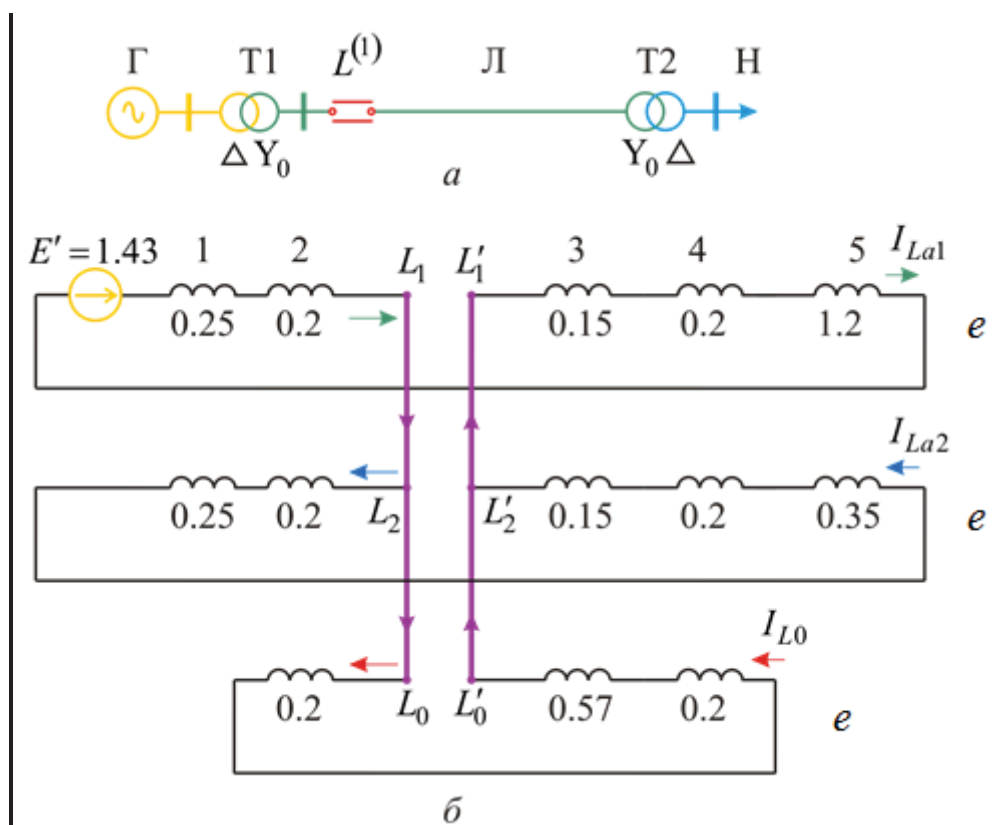


Рис. 8.9. К примеру 8.2: а – исходная схема; б – комплексная схема замещения

Решение

1. Результирующие реактивности схем прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно места разрыва составляют:

$$x_{L1\Sigma} = 0,15 + 0,2 + 1,2 + 0,25 + 0,2 = 2,0;$$

$$x_{L2\Sigma} = 0,15 + 0,2 + 0,35 + 0,25 + 0,2 = 1,15;$$

$$x_{L0\Sigma} = 0,57 + 0,2 + 0,2 = 0,97,$$

и дополнительная реактивность –

$$x_{\Delta L}^{(1)} = x_{L2\Sigma} // x_{L0\Sigma} = 1,15 // 0,97 = 0,526.$$

2. Расчет токов схемы.

Определим симметричные составляющие токов в схемах отдельных последовательностей:

$$\mathbf{I}_{La1} = \frac{\mathbf{E}'_{1\Sigma}}{j(x_{L1\Sigma} + x_{\Delta L}^{(1)})} = \frac{j1,43}{j(2 + 0,526)} = 0,565;$$

$$\mathbf{I}_{La2} = -\mathbf{I}_{La1} \frac{x_{\Delta L}^{(1)}}{x_{L2\Sigma}} = -0,565 \frac{0,526}{1,15} = -0,258;$$

$$\mathbf{I}_{L0} = -0,565 \frac{0,526}{0,97} = -0,307,$$

что позволяет рассчитать ток в неповрежденных фазах линии:

$$\mathbf{I}_{LB} = \mathbf{I}_{LC} = \mathbf{a}^2 \cdot 0,565 - \mathbf{a} \cdot 0,258 - 0,307 = 0,85e^{j237^\circ}.$$

Модуль этих токов можно определить и по выражению (8.18), используя коэффициент $m^{(1,1)}$, т. е.

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{1,15 \cdot 0,97}{(1,15 + 0,97)^2}} \cdot 0,565 = 0,85.$$

3. Расчет напряжений в узлах схемы.

Найдем симметричные составляющие напряжения на клемме L' , учитывая, что в узле e схем отдельных последовательностей напряжения равны нулю:

$$\mathbf{U}_{L'a1} = \mathbf{I}_{La1} j(x_3 + x_4 + x_5) = 0,565 j(0,15 + 0,2 + 1,2) = j0,876;$$

$$\mathbf{U}_{L'a2} = \mathbf{I}_{La2} j(x_3 + x_4 + x_5) = -0,258 j(0,15 + 0,2 + 0,35) = -j0,18;$$

$$\mathbf{U}_{L'0} = \mathbf{I}_{L0} j(x_3 + x_4) = -0,307 j(0,57 + 0,2) = -j0,236.$$

На базе найденных значений симметричных составляющих напряжений определяем фазные напряжения в узле L' :

$$\mathbf{U}_{L'A} = j(0,876 - 0,18 - 0,236) = j0,46;$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{L'B} &= 0,876e^{j(240^\circ + 90^\circ)} + 0,18e^{j(120^\circ - 90^\circ)} + 0,236e^{-j90^\circ} = \\ &= 1,085e^{-j32,56^\circ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{L'C} &= 0,876e^{j(120^\circ + 90^\circ)} + 0,18e^{j(240^\circ - 90^\circ)} + 0,236e^{-j90^\circ} = \\ &= 1,085e^{-j147,44^\circ}. \end{aligned}$$

Рассчитаем симметричные составляющие падения напряжения в месте разрыва:

$$\Delta U_{La1} = \Delta U_{La2} = \Delta U_{L0} = I_{La1} jx_{\Delta L}^{(1)} = 0,565 j0,526 = j0,297$$

и симметричные составляющие напряжения на клемме L :

$$U_{La1} = U_{L'a1} + \Delta U_{La1} = j(0,876 + 0,297) = j1,173;$$

$$U_{La2} = U_{L'a2} + \Delta U_{La2} = j(-0,18 + 0,297) = j0,117;$$

$$U_{L0} = U_{L'0} + \Delta U_{L0} = j(-0,236 + 0,297) = j0,061.$$

Напряжение фазы A на стороне L через симметричные составляющие определится так:

$$U_{LA} = j(1,173 + 0,117 + 0,061) = j1,351,$$

или через вектор падения напряжения в месте разрыва

$$U_{LA} = U_{L'A} + \Delta U_{LA} = j(0,46 + 3 \cdot 0,297) = j1,351.$$

Для неповрежденных фаз B и C фазные напряжения со стороны клеммы L' и L одинаковы. Эпюры напряжений отдельных последовательностей приведены на рис. 8.10, б.

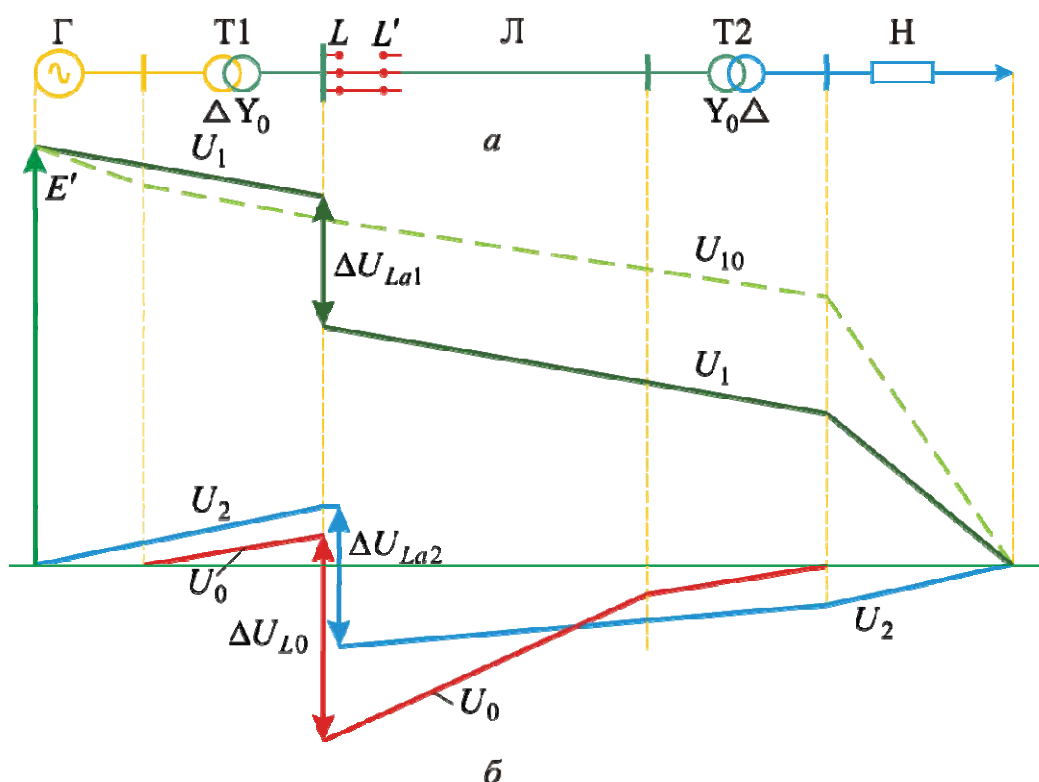


Рис. 8.10. К примеру 8.2: а – принципиальная схема; б – эпюры напряжений при разрыве одной фазы

Пунктиром показано распределение напряжения в нормальном режиме. В месте разрыва напряжения обратной и нулевой последовательностей меняют свой знак. Векторные диаграммы напряжений в месте разрыва представлены на рис. 8.3.

Пример 8.3. Схема (рис. 8.11, а) питается системой, характеризуемой $E_C = \text{const}$. За линейным реактором на стороне 6 кВ происходит трехфазное короткое замыкание. Определить значения токов КЗ для следующих условий: наличие реактора; отсутствие реактора; одна из фаз реактора закорочена.

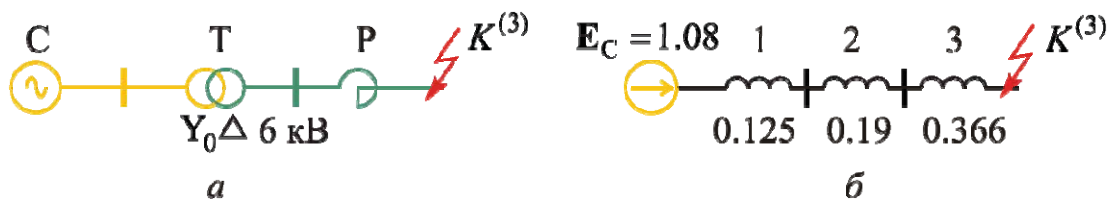


Рис. 8.11. К примеру 8.3: а – принципиальная схема; б – схема замещения прямой последовательности

Исходные данные. Параметры схем прямой и обратной последовательностей одинаковы и представлены на рис. 8.11, б в относительных единицах при принятых базисных условиях ($I_6 = 9,16$ кА на стороне 6 кВ).

Решение

1. При наличии реактора

$$x_{1\Sigma} = 0,125 + 0,19 + 0,366 = 0,681$$

и значение тока трехфазного КЗ в относительных единицах

$$\mathbf{I}_K^{(3)} = \frac{jE_C}{jx_{1\Sigma}} = \frac{1,08}{0,681} = 1,59$$

и в именованных – $\mathbf{I}_K^{(3)} = 1,59 \cdot 9,16 = 14,6$ кА.

2. При отсутствии реактора в схеме

$$x_{1\Sigma} = 0,125 + 0,19 = 0,315,$$

и значение тока трехфазного КЗ в именованных единицах

$$\mathbf{I}_K^{(3)} = \frac{jE_C}{jx_{1\Sigma}} I_6 = \frac{1,08}{0,315} \cdot 9,16 = 31,4 \text{ кА.}$$

3. При условии закорачивания одной фазы реактора.

Закорачивание фазы реактора эквивалентно включению в эту фазу реактивности $x = -0,366$ при условии наличия реактора во всех трех фазах. Расчетные выражения заимствуем из табл. 8.1 для несимметрии $L^{(1)}$.

Учитывая, что результирующая реактивность нулевой последовательности равна бесконечности ($x_{0\Sigma} = \infty$), дополнительная реактивность, включаемая в схему прямой последовательности, будет составлять

$$x_{\Delta L}^{(1)} = \left(\frac{-x_3}{3} \right) // x_{2\Sigma} = \left(-\frac{0,366}{3} \right) // 0,681 = -0,149.$$

Находим симметричные составляющие токов фазы A :

$$\mathbf{I}_{La1} = \frac{\mathbf{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta L}^{(1)})} = \frac{j1,08}{j(0,681 - 0,149)} = 2,03;$$

$$\mathbf{I}_{La2} = -\frac{x_{\Delta L}^{(1)}}{x_{2\Sigma}} \mathbf{I}_{La1} = -\frac{(-0,149)}{0,681} 2,03 = 0,444.$$

Наибольший ток будет в фазе A (в которой условно отсутствует реактор):

$$\mathbf{I}_L = (\mathbf{I}_{La1} + \mathbf{I}_{La2}) I_{\sigma} = (2,03 + 0,444) \cdot 9,16 = 22,66 \text{ кА};$$

токи в фазах B и C составляют около 17 кА.

Таким образом, закорачивание одной фазы реактора при заданных условиях приводит к увеличению тока короткого замыкания в 1,55 раза.

8.5. Двойное замыкание на землю

Сложные виды повреждений представляют совокупность нескольких несимметричных замыканий или продольной несимметрии отдельных участков в системе. Возможно и одновременное возникновение продольной и поперечной несимметрий в различных комбинациях.

Наибольший практический интерес представляют одновременное короткое замыкание в двух точках схем электроснабжения с изолированной нейтралью и одновременное короткое замыкание на землю с разрывом той же фазы в системе с заземленной нейтралью. Более сложные виды повреждений маловероятны.

Получим расчетные выражения для двойного замыкания на землю.

Считаем, что в произвольных точках M и N трехфазной сети произошли одновременные замыкания на землю фаз B и C соответственно (см. рис. 8.12, a).

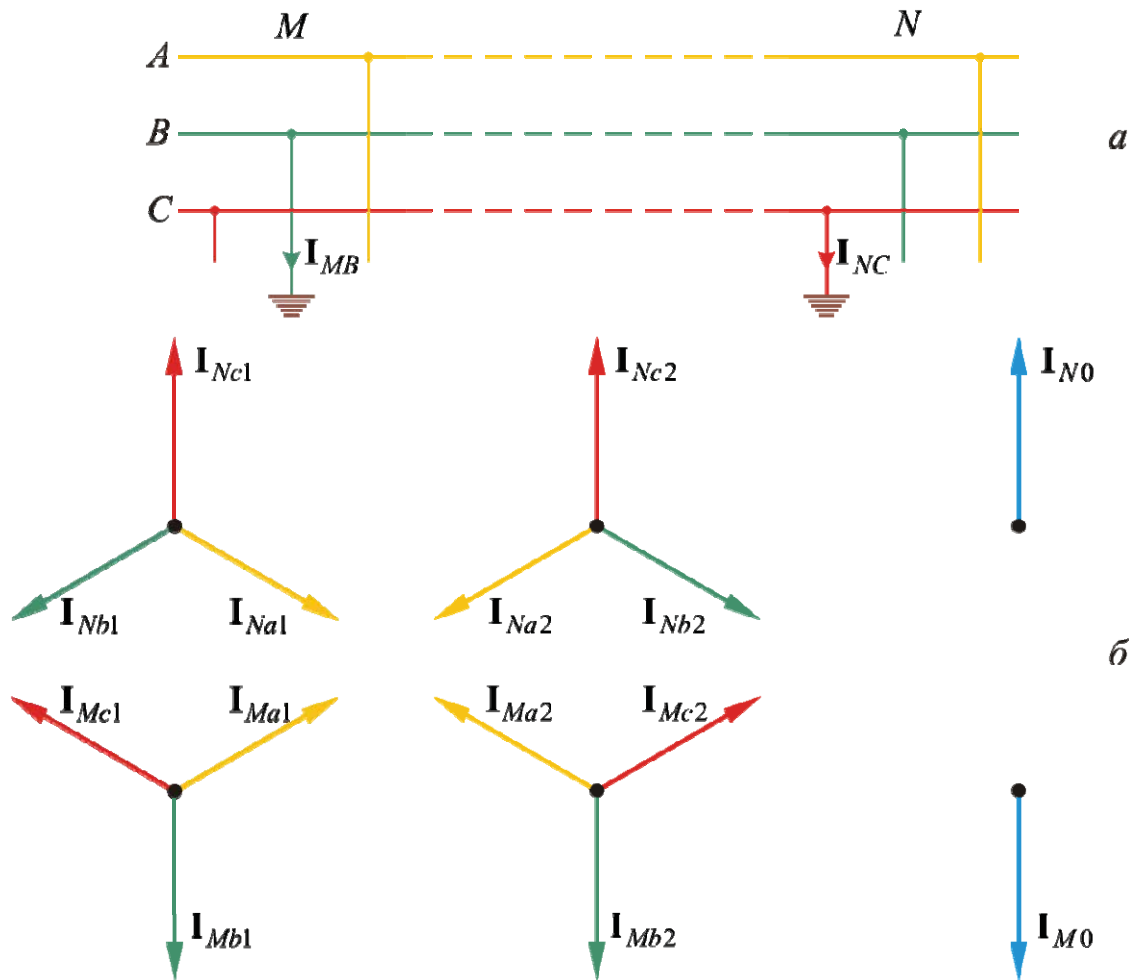


Рис. 8.12. Двойное замыкание на землю: а – принципиальная схема; б – симметричные составляющие токов в местах КЗ

Для упрощения полагаем, что замыкания металлические и элементы схемы чисто индуктивные.

Аналогично простому однофазному замыканию, рассмотренному в разд. 7.3, граничные условия в обеих точках имеют следующий вид:

$$I_{MA} = 0, \quad I_{MC} = 0, \quad U_{MB} = 0; \quad (8.27)$$

$$I_{NA} = 0, \quad I_{NB} = 0, \quad U_{NC} = 0, \quad (8.28)$$

и дополнительным условием данного вида повреждения, очевидно, является равенство:

$$I_{MB} = -I_{NC}. \quad (8.29)$$

Приняв неповрежденную фазу A за основную, запишем вытекающие из граничных условий соотношения между симметричными составляющими токов (рис. 8.12, б):

$$\mathbf{I}_{Mb1} = \mathbf{I}_{Mb2} = \mathbf{I}_{M0}; \quad (8.30)$$

$$\mathbf{I}_{Nc1} = \mathbf{I}_{Nc2} = \mathbf{I}_{N0}; \quad (8.31)$$

$$\mathbf{I}_{Ma2} = a \mathbf{I}_{Ma1}, \quad \mathbf{I}_{M0} = a^2 \mathbf{I}_{Ma1}; \quad (8.32)$$

$$\mathbf{I}_{Na2} = a^2 \mathbf{I}_{Na1}, \quad \mathbf{I}_{N0} = a \mathbf{I}_{Na1}; \quad (8.33)$$

$$\mathbf{U}_{Mb1} + \mathbf{U}_{Mb2} + \mathbf{U}_{M0} = a^2 \mathbf{U}_{Ma1} + a \mathbf{U}_{Ma2} + \mathbf{U}_{M0} = 0;$$

$$\mathbf{U}_{Nc1} + \mathbf{U}_{Nc2} + \mathbf{U}_{N0} = a \mathbf{U}_{Na1} + a^2 \mathbf{U}_{Na2} + \mathbf{U}_{N0} = 0.$$

Дополнительно из соотношения (8.29), с учетом (8.30)–(8.33), имеем связь симметричных составляющих токов прямой последовательности для точек M и N

$$\mathbf{I}_{Na1} = -a \mathbf{I}_{Ma1}. \quad (8.34)$$

Приведенные соотношения показывают, что симметричные составляющие токов всех трех последовательностей в точках M и N равны между собой по модулю и отличаются только фазами; связь симметричных составляющих токов в обоих местах замыкания определяется условием (8.34).

Схемы замещения отдельных последовательностей при двойном замыкании могут быть приведены к виду, представленному на рис. 8.13. Они позволяют установить связь между токами и напряжениями в узлах M и N для схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

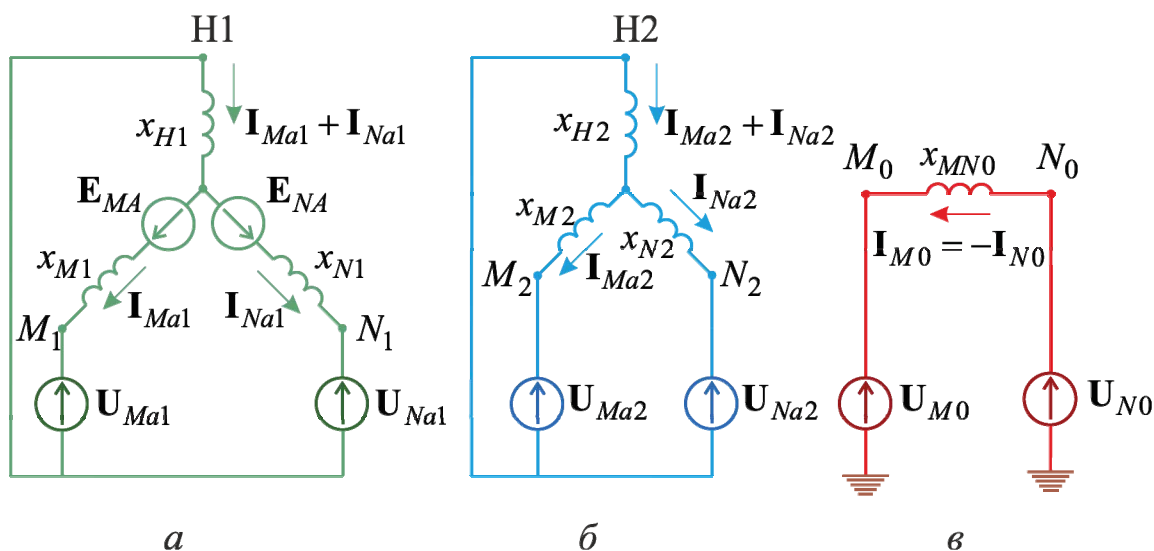


Рис. 8.13. Схемы замещения прямой (а), обратной (б), нулевой (в) последовательностей при двойном замыкании на землю

Полный анализ двойного замыкания требует расчета 12 параметров в точках КЗ (три симметричных составляющих напряжения и три составляющих тока для каждой точки). Для этого необходимо решить 12 уравнений, связывающих названные переменные. Первые семь уравнений представляют граничные условия (8.27)–(8.29). К ним нужно добавить 5 уравнений второго закона Кирхгофа, записанных для схем различных последовательностей (см. рис. 8.13).

Выражая все неизвестные через ток \mathbf{I}_{Ma1} , получаем для него расчетную формулу

$$\mathbf{I}_{Ma1} = \frac{\mathbf{E}_{MA} - a^2 \mathbf{E}_{NA}}{j(3x_{H1} + x_{M1} + x_{N1} + x_D)}, \quad (8.35)$$

где
$$x_D = 3x_{H2} + x_{M2} + x_{N2} + x_{MN0}. \quad (8.36)$$

Токи поврежденных фаз в месте замыкания вычисляем по соотношению

$$\mathbf{I}_{MB} = 3a^2 \mathbf{I}_{Ma1} = -\mathbf{I}_{NC}. \quad (8.37)$$

Расчетные выражения для симметричных составляющих напряжений в точках M и N удобно представить через ток $\mathbf{I}_{M0} = a^2 \mathbf{I}_{Ma1}$ или ($\mathbf{I}_{N0} = -\mathbf{I}_{M0}$):

$$\mathbf{U}_{Ma1} = \mathbf{E}_{MA} - j\mathbf{I}_{M0} \left[(a - a^2)x_{H1} + ax_{M1} \right]; \quad (8.38)$$

$$\mathbf{U}_{Ma2} = -j\mathbf{I}_{M0} \left[(a^2 - a)x_{H2} + a^2x_{M2} \right]; \quad (8.39)$$

$$\mathbf{U}_{M0} = -\left(a^2 \mathbf{U}_{Ma1} + a \mathbf{U}_{Ma2} \right); \quad (8.40)$$

$$\mathbf{U}_{Na1} = \mathbf{E}_{NA} - j\mathbf{I}_{M0} \left[(a - a^2)x_{H1} - a^2x_{N1} \right]; \quad (8.41)$$

$$\mathbf{U}_{Na2} = -j\mathbf{I}_{M0} \left[(a^2 - a)x_{H2} - ax_{N2} \right]; \quad (8.42)$$

$$\mathbf{U}_{N0} = -\left(a \mathbf{U}_{Na1} + a^2 \mathbf{U}_{Na2} \right). \quad (8.43)$$

Векторные диаграммы токов и напряжений в местах КЗ приведены на рис. 8.14. Критерием правильности расчета (построения диаграмм) является перпендикулярность векторов $(\mathbf{U}_{N0} - \mathbf{U}_{M0})$ и \mathbf{I}_{M0} . Наибольшее остаточное напряжение имеет здоровая фаза A ; напряжение поврежденных фаз B и C в месте их короткого замыкания на землю равно нулю и по мере удаления от КЗ возрастает.

Схема нулевой последовательности приобретает ту же конфигурацию, что и схема прямой (обратной) последовательности, когда рассматриваемая сеть работает с заземленными (компенсированными) нейтральными. ЭДС, входящие в схему прямой последовательности, E_M и E_N определяются преобразованиями, приведенными в [1, прил. 1].

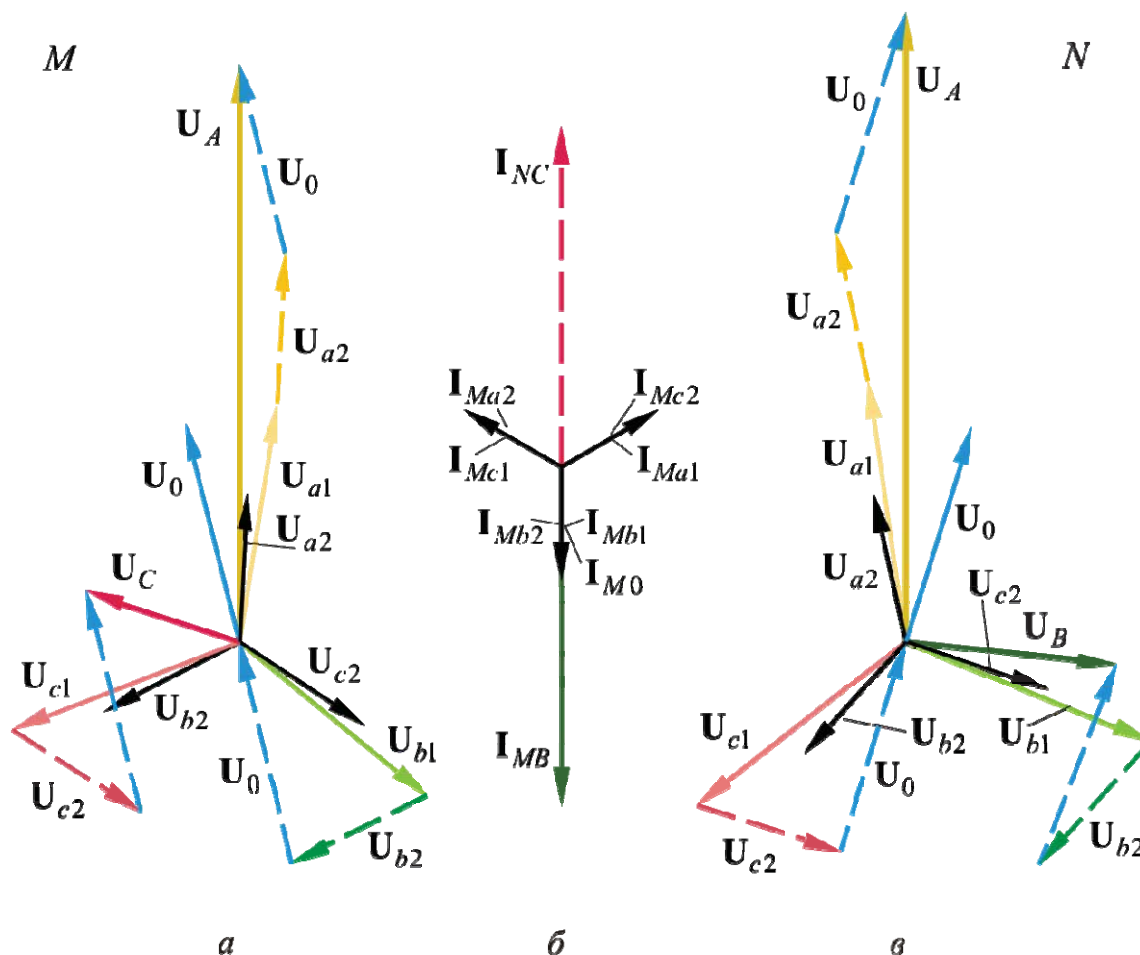


Рис. 8.14. Двойное замыкание на землю: а, в – векторные диаграммы напряжений в точках М и N; б – то же токов в точке М

Пример 8.4. Исходные данные для настоящего примера позаимствованы из [1].

При одновременном замыкании на землю фаз В и С соответственно в точках М и N схемы, представленной на рис. 8.15, а, определить ток короткого замыкания и фазные напряжения в местах повреждения.

Расчеты проведем для начального момента времени, считая, что генератор до включения в сеть работал на холостом ходу. При этих условиях начальное значение сверхпереходной ЭДС синхронного генератора равно его напряжению в нормальном режиме.

Исходные данные

Генератор Г: $S = 37,5$ МВА, $U = 6,3$ кВ, $x''_d = 0,143 \approx x_2$.

Трансформатор Т1: $S = 25$ МВА, $U_B / U_H = 37 / 6,3$ кВ, $U_K = 8 \%$, Y / Δ -11.

Трансформатор Т2: $S = 40$ МВА, $U_B / U_C / U_H = 115 / 37 / 10,5$ кВ, $U_{K(B-C)} = 10,5 \%$, $Y_0 / Y / \Delta$ -12, 11.

Линия Л: $L = 12,5$ км, $x_1 = 0,4$ Ом/км, $x_0 = 1,45$ Ом/км.

Система С: источник бесконечной мощности; $U_C = 115$ кВ, $x_1 = x_2 = x_3 = 0$.

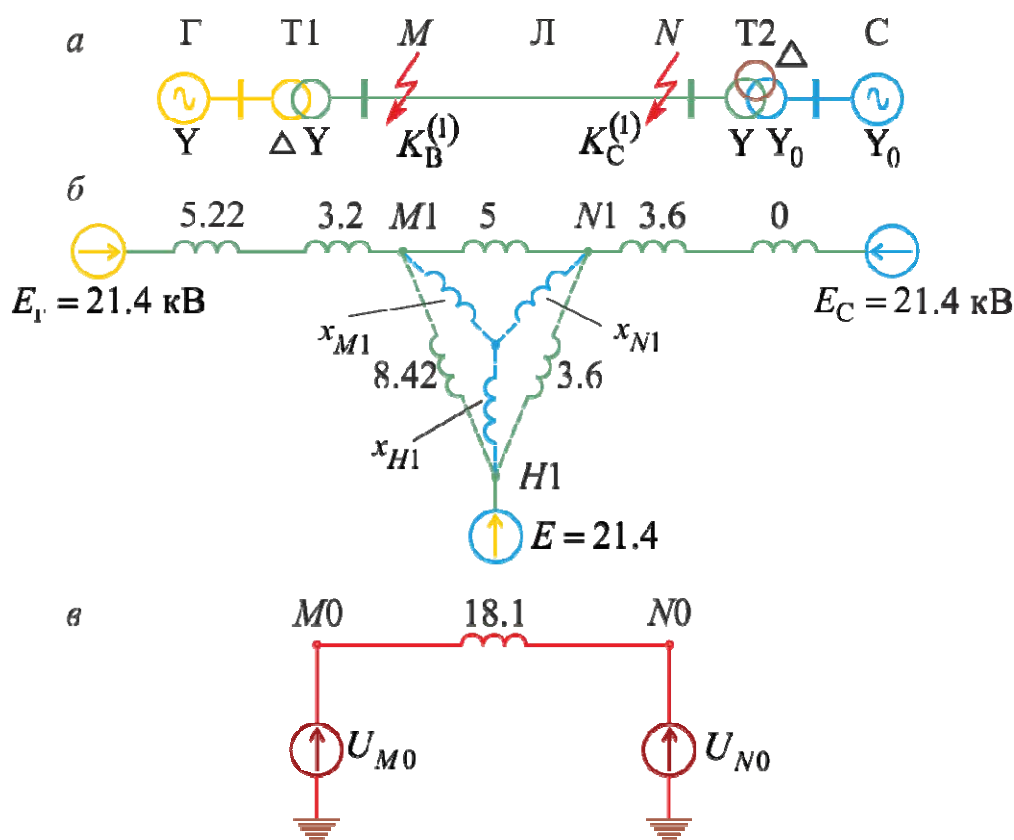


Рис. 8.15. Схемы к примеру 8.4: а – исходная схема; б – схема замещения прямой (обратной) последовательности; в – то же нулевой последовательности

Решение. Расчет проведем в именованных единицах, отнеся все элементы к стороне линии. Рассчитаем параметры элементов схем замещения (рис. 8.15, б, в):

- генератора:

$$x''_d = 0,143 \frac{37^2}{37,5} = 5,22 \text{ Ом}, \quad E'' = \frac{6,3}{\sqrt{3}} \cdot \frac{37}{6,3} = 21,4 \text{ кВ};$$

- трансформатора Т1:

$$x_{T1} = 0,08 \frac{37^2}{25} = 3,2 \text{ Ом};$$

- трансформатора Т2:

$$x_{T2} = 0,105 \frac{37^2}{40} = 3,6 \text{ Ом};$$

- линии Л:

$$x_1 = 0,4 \cdot 12,5 = 5 \text{ Ом}, \quad x_0 = 1,45 \cdot 12,5 = 18,5 \text{ Ом};$$

- системы С:

$$E_C = \frac{115}{\sqrt{3}} \cdot \frac{37}{115} = 21,4 \text{ кВ}.$$

На рис. 6.44, б показана схема замещения прямой последовательности, где указаны реактивности (в Омах) всех элементов и ЭДС (в киловольтах) источников. Схема замещения обратной последовательности совпадает со схемой прямой последовательности при исключении из нее ЭДС. Схема нулевой последовательности (см. рис. 8.15, в) содержит только один элемент (линия).

Объединяя начала генерирующих ветвей, получаем «треугольник» сопротивлений, в котором сторона $M_1 - H_1$ равна плечу $E_T - M_1$, и сторона $N_1 - H_1$ равна плечу $N_1 - E_C$. Преобразование «треугольника» сопротивлений $M_1 - H_1 - N_1$ в эквивалентную «звезду» дает реактивности элементов схемы прямой (обратной) последовательности: $x_{M1} = x_{M2} = 2,47 \text{ Ом}$, $x_{N1} = x_{N2} = 1,06 \text{ Ом}$, $x_{H1} = x_{H2} = 1,78 \text{ Ом}$.

По (8.36) находим $x_D = 3 \cdot 1,78 + 2,47 + 1,06 + 18,1 = 27 \text{ Ом}$.

Принимая $E_A = j21,4 \text{ кВ}$, по выражению (8.35) находим ток прямой последовательности

$$\mathbf{I}_{Ma1} = \frac{j21,4(1-a^2)}{j(3 \cdot 1,78 + 2,47 + 1,06 + 27)} = 1,03 e^{j30^\circ} \text{ кА}.$$

Токи обратной и нулевой последовательностей составляют:

$$\mathbf{I}_{Ma2} = a \mathbf{I}_{Ma1} = 1,03 e^{j150^\circ} \text{ кА}, \quad \mathbf{I}_{M0} = a^2 \mathbf{I}_{Ma1} = -j1,03 \text{ кА}.$$

Рассчитываем ток в местах короткого замыкания на землю (он же является током в земле):

$$\mathbf{I}_{MB} = -\mathbf{I}_{NC} = 3\mathbf{I}_{M0} = -j3,09 \text{ кА}.$$

Для симметричных составляющих напряжений в точке М по выражениям (8.38)–(8.40) имеем:

$$U_{Ma1} = j21,4 - 1,03 \left[(a - a^2)1,78 + a2,47 \right] = 1,27 + j16,0 \text{ кВ};$$

$$U_{Ma2} = -1,03 \left[(a^2 - a)1,78 + a^2 2,47 \right] = 1,27 + j5,37 \text{ кВ};$$

$$U_{M0} = - \left[a^2(1,27 + j16) + a(1,27 + j5,37) \right] = -7,95 + j10,7 \text{ кВ}.$$

Аналогично для симметричных составляющих напряжений в точке N получаем:

$$U_{Na1} = -0,55 + j17,28 \text{ кВ};$$

$$U_{Na2} = -0,55 + j4,12 \text{ кВ};$$

$$U_{N0} = 10,9 + j10,7 \text{ кВ}.$$

Находим фазные напряжения в узле M :

- неповрежденной фазы A :

$$U_{MA} = U_{Ma1} + U_{Ma2} + U_{M0} = (1,27 + j16) + (1,27 + j5,37) + (-7,95 + j10,7) = -5,4 + j32,1 = 32,5e^{j99,5^\circ} \text{ кВ};$$

- замкнувшей фазы B :

$$U_{MB} = a^2 U_{Ma1} + a U_{Ma2} + U_{M0} = a^2(1,27 + j16) + a(1,27 + j5,37) + (-7,95 + j10,7) = 0;$$

- неповрежденной фазы C :

$$U_{MC} = a U_{Ma1} + a^2 U_{Ma2} + U_{M0} = a(1,27 + j16) + a^2(1,27 + j5,37) + (-7,95 + j10,7) = -18,44 \text{ кВ}.$$

Аналогичным образом рассчитываем остаточные напряжения фаз A и B в точке N :

$$U_{NA} = 33,5e^{j73^\circ} \text{ кВ}, \quad U_{NB} = 22,85 \text{ кВ}, \quad U_{NC} = 0.$$

Отметим, что

$$U_{N0} - U_{M0} = (10,9 + j10,7) - (-7,95 + j10,7) = 18,85 \approx jI_{M0}x_{MN0} = -j1,03(j18,1) = 18,7 \text{ кВ}.$$

8.6. Однофазное КЗ с разрывом фазы

Рассматриваем сеть с заземленной нейтралью. Считаем, что происходит разрыв одной фазы (A), при этом один конец провода этой фазы заземляется, образуя однофазное КЗ, а другой остается изолированным (см. рис. 8.16).

Для рассматриваемого случая двойной несимметрии имеем граничные условия:

для однофазного КЗ –

$$\mathbf{I}_{KB} = 0, \quad \mathbf{I}_{KC} = 0, \quad \mathbf{U}_{KA} = 0;$$

для обрыва фазы –

$$\mathbf{I}_{LA} = 0, \quad \Delta \mathbf{U}_{LB} = 0, \quad \Delta \mathbf{U}_{LC} = 0.$$

Этим граничным условиям соответствуют следующие соотношения:

$$\mathbf{I}_{Ka1} = \mathbf{I}_{Ka2} = \mathbf{I}_{K0};$$

$$\mathbf{U}_{Ka1} + \mathbf{U}_{Ka2} + \mathbf{U}_{K0} = 0;$$

$$\mathbf{I}_{L1} + \mathbf{I}_{L2} + \mathbf{I}_{L0} = 0;$$

$$\Delta \mathbf{U}_{La1} = \Delta \mathbf{U}_{La2} = \Delta \mathbf{U}_{L0}.$$

Дополним эти соотношения уравнениями (6.12), (6.13), (8.2) и (8.3) и решим полученную систему относительно \mathbf{U}_{Ka1} и $\Delta \mathbf{U}_{La1}$:

$$\mathbf{U}_{Ka1} = jx_K \mathbf{I}_{Ka1} + jx_{KL} \mathbf{I}_{La1};$$

$$\Delta \mathbf{U}_{La1} = jx_{LK} \mathbf{I}_{Ka1} + jx_L \mathbf{I}_{La1}. \quad (8.44)$$

Здесь
$$x_K = x_{K2} + x_{K0} - \frac{(x_{KL2} - x_{KL0})^2}{x_{L2} + x_{L0}};$$

$$x_L = \frac{x_{L2}x_{L0}}{x_{L2} + x_{L0}}, \quad x_{KL} = \frac{x_{KL2}x_{L0} + x_{KL0}x_{L2}}{x_{L2} + x_{L0}},$$

где x_{K2}, x_{K0} – реактивности схем обратной и нулевой последовательностей относительно точки КЗ при отсутствии разрыва схемы в точке L ; x_{L2}, x_{L0} – то же относительно места разрыва при отсутствии КЗ; x_{KL2}, x_{KL0} – взаимные реактивности между точкой КЗ и местом разрыва в схемах соответствующих последовательностей.

Для условий совпадения особых фаз точек несимметрии K и L и наличия электрической связи между ними справедливо $x_{KL} = x_{LK}$ [6]. В этом случае уравнениям (8.44) соответствует точная электрическая схема замещения в форме трехлучевой звезды, элементы которой зависят только от реактивностей обратной и нулевой последовательностей.

Преобразуем уравнения (8.44), введя в правую часть каждого из них два одинаковых, но противоположных по знаку слагаемых (положительное направление падений напряжения принято противоположным положительному направлению тока):

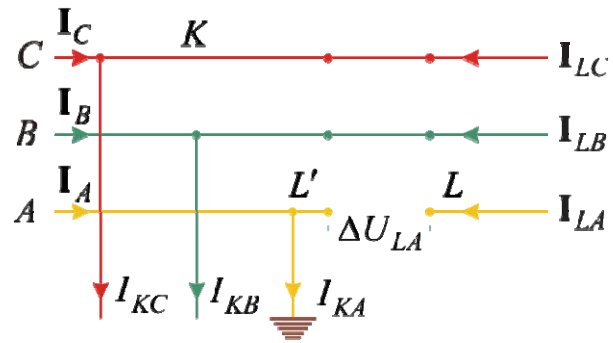


Рис. 8.16. Однофазное КЗ с одновременным разрывом фазы

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{Ka1} &= jx_K \mathbf{I}_{Ka1} + jx_{KL} \mathbf{I}_{La1} + jx_{KL} \mathbf{I}_{Ka1} - jx_{KL} \mathbf{I}_{Ka1} = \\ &= j(x_K + x_{KL}) \mathbf{I}_{Ka1} + (-jx_{KL})(\mathbf{I}_{Ka1} - \mathbf{I}_{La1}); \end{aligned} \quad (8.45)$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{U}_{La1} &= jx_{KL} \mathbf{I}_{Ka1} + jx_L \mathbf{I}_{La1} + jx_{KL} \mathbf{I}_{La1} - jx_{KL} \mathbf{I}_{La1} = \\ &= -[(-jx_{KL})(\mathbf{I}_{Ka1} - \mathbf{I}_{La1})] + j(x_L + x_{KL}) \mathbf{I}_{La1}. \end{aligned} \quad (8.46)$$

Схема замещения, параметры ее элементов, положительные направления токов, соответствующие уравнениям (8.45), (8.46), приведены на рис. 8.17. Ее присоединение к исходной схеме прямой последовательности в точках K и L дает схему эквивалентную токам прямой последовательности. Из этой схемы (рис. 8.17) следует, что расчет токов и напряжений прямой последовательности для рассматриваемого вида несимметрии сводится к расчету эквивалентного трехфазного замыкания в фиктивной точке G , связанной с точками $K1$ и $L1$ схемы прямой последовательности реактивностями $(-x_{KL})$, $(x_K + x_{KL})$ и $(x_L + x_{KL})$. Иными словами, соблюдается правило эквивалентности прямой последовательности.

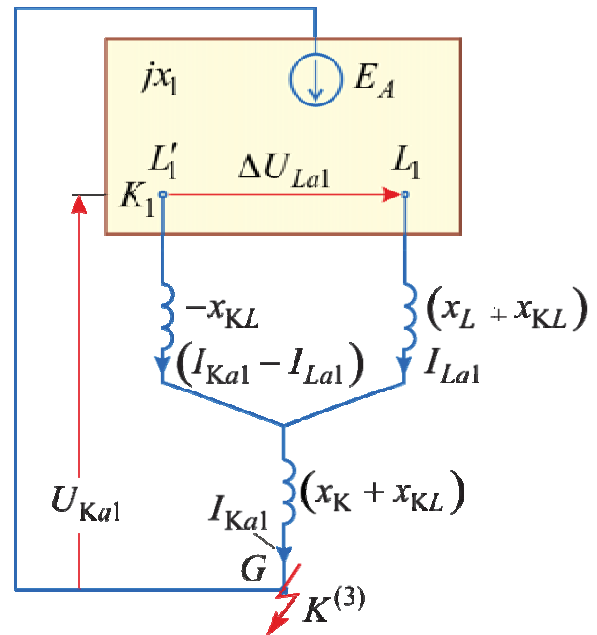


Рис. 8.17. Схема эквивалентная токам прямой последовательности для однофазного КЗ с разрывом фазы

Справедливость осуществленных преобразований уравнений (8.44) проверим расчетом потенциала \mathbf{U}_{La1} по контуру G, F, L_1 схемы:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{La1} &= j(x_K + x_{KL}) \mathbf{I}_{Ka1} + j(x_L + x_{KL}) \mathbf{I}_{La1} = \\ &= j(x_K \mathbf{I}_{Ka1} + x_{KL} \mathbf{I}_{La1}) + j(x_{KL} \mathbf{I}_{Ka1} + x_L \mathbf{I}_{La1}) = \mathbf{U}_{Ka1} + \Delta \mathbf{U}_{La1}. \end{aligned}$$

Для приведенной схемы рассмотрим частный случай: наличие только продольной несимметрии. Отсутствию КЗ соответствует разрыв связи $G - F$ ($x_K = \infty$; $\mathbf{I}_{Ka1} = 0$). Ветвь $L'_1 - F - L_1$ представляет дополнительную реактивность для продольной несимметрии (x_L), включенную в место разрыва; при этом x_L соответствует разрыву одной фазы.

Как правило, наибольший интерес представляет ток короткого замыкания в месте повреждения фазы. Если все приведенные ЭДС источ-

ников равны между собой, а также равны реактансы (элементов в схемах прямой и обратной последовательностей), то ток \mathbf{I}_{Ka1} в месте короткого замыкания при одновременном разрыве замкнувшей фазы определится по выражению

$$\mathbf{I}_{Ka1} = \frac{\mathbf{E}}{j(x^{(1)} + \alpha x_{(L)})}, \quad (8.47)$$

где $x^{(1)} = 2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma}$, а $x_{1\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ – результирующие реактивности при однофазном коротком замыкании в точке K и отсутствии разрыва фазы,

$$\alpha = \left(\frac{x_{KL0}}{x_{L0}} + 2 \frac{x_{KL1}}{x_{L1}} \right)^2, \quad x_{(L)} = \frac{x_{L1}x_{L0}}{x_{L1} + 2x_{L0}}, \quad x_{L1} = x_{L2} \text{ и } x_{KL1} = x_{KL2}.$$

Здесь реактивности имеют тот же смысл, что и в выражениях (8.44).

Ток КЗ определяется по известному соотношению

$$\mathbf{I}_K = 3\mathbf{I}_{Ka1}.$$

Сравнение выражений (8.47) и (7.16) показывает, что одновременное короткое замыкание с разрывом фазы приводит к уменьшению тока КЗ, в отличие от случая отсутствия разрыва.

Для многократной несимметрии, подобно однократной, также можно пользоваться комплексной схемой замещения. Однако при соединении схем отдельных последовательностей по месту повреждений имеются особенности. Электрически соединение схем возможно лишь по какой-либо одной точке несимметрии, а по второй точке повреждения соединение осуществляется через промежуточные трансформаторы. Эти трансформаторы должны иметь ничтожное рассеяние и очень большое сопротивление намагничивания. С такими требованиями к трансформаторам связи использование комплексных схем возможно на вычислительной технике.

Контрольные вопросы

1. Где располагаются клеммы начала и конца схем замещения различных последовательностей при продольной несимметрии?
2. В чем особенность расчета результирующих сопротивлений схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей при продольной несимметрии?
3. В чем заключается отличие определения результирующей ЭДС в продольной несимметрии от поперечной?
4. Что понимается под термином «сложные виды несимметрии»?

Глава 9

ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ И ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ДО 1 КВ

9.1. Общие замечания

Электрические сети напряжением 6...35 кВ принято называть распределительными, поскольку по ним осуществляется электроснабжение большинства потребителей. Надежность распределительных сетей существенно ниже, чем сетей более высокого класса напряжений. На долю первых приходится 70...75 % общего числа повреждений в энергосистемах.

При анализе режимов короткого замыкания следует учитывать ряд характерных особенностей, присущих распределительным сетям.

1. Сети 6...35 кВ удалены от системных генерирующих источников двумя–тремя ступенями трансформации. По этой причине переходные процессы в указанных сетях слабо влияют на режимы генераторов и системообразующих сетей. Поэтому при КЗ в распределительных сетях *напряжение на высшей стороне питающего трансформатора можно считать постоянным*. Местные электрические станции, крупные электродвигатели и синхронные компенсаторы, находящиеся в распределительной сети, *учитываются индивидуально*.

2. В распределительных сетях используются воздушные и кабельные линии сравнительно малых сечений. Это приводит к необходимости *учета активных сопротивлений* при расчете режимов короткого замыкания.

3. Распределительные сети 6...35 кВ имеют изолированную или компенсированную нейтраль (заземление нейтрали через большое индуктивное сопротивление). В этих условиях, при однофазном замыкании на землю, ток определяется емкостной проводимостью здоровых фаз относительно земли. Он значительно меньше тока однофазного КЗ в сети с глухозаземленной нейтралью. Поэтому сети с изолированной нейтралью *могут длительно работать в режиме однофазного КЗ*. Это позволяет обслуживающему персоналу создавать временные схемы электроснабжения потребителей без их отключения.

4. При длительных режимах КЗ ($t = 0,4...0,6$ с) вследствие повышения температуры проводника происходит увеличение его активного сопротивления. Это, в свою очередь, может вызвать заметное снижение тока короткого замыкания и называется *эффектом теплового спада тока КЗ*. Учет этого фактора изложен в [1, 12, 14].

5. Электрические установки до 1000 В имеют еще большую удаленность, что позволяет с полным основанием считать *напряжение на высшей стороне трансформатора, питающего эту сеть, постоянным*. Кроме того, здесь необходимо дополнительно учитывать специфические особенности (переходные сопротивления в местах контактных соединений элементов схемы, в месте КЗ и др.), которые рассматриваются ниже.

9.2. ОДНОФАЗНОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Замыкание фазы на землю в сети с изолированной нейтралью принято называть *простым замыканием*. Рассмотрим простейшую трехфазную сеть, в которой произошло простое замыкание фазы *A* (рис. 9.1). Емкости, распределенные вдоль линии каждой фазы относительно земли, представлены для простоты сосредоточенными (C_A, C_B, C_C). Межфазные емкости не оказывают ощутимого влияния на режим короткого замыкания и на рис. 9.1 не отражены.

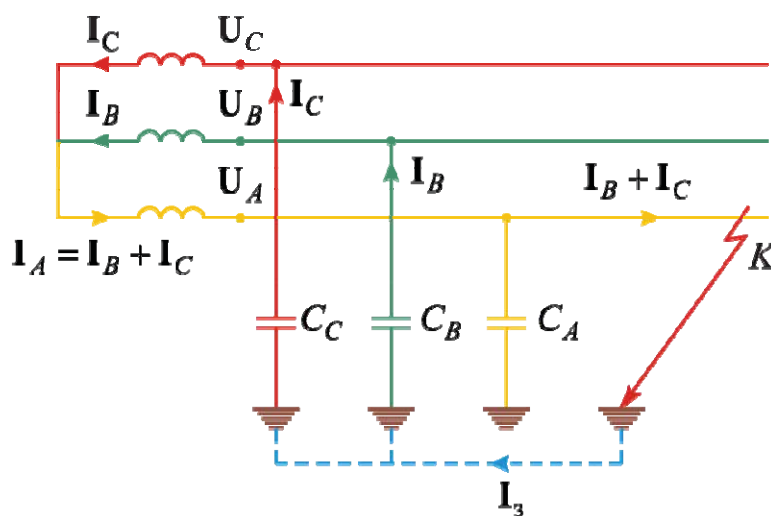


Рис. 9.1. Распределение токов при простом замыкании на землю

Емкостная проводимость поврежденной фазы зашунтирована коротким замыканием; приложенное к C_A напряжение равно нулю, и, следовательно, ток через указанную емкость не протекает. Ток КЗ обусловлен суммой емкостных токов фаз *B* и *C*, и их распределение показано на рис. 9.1.

Граничные условия для простого замыкания на землю те же, что и для однофазного КЗ в сетях с заземленной нейтралью, поэтому расчет-

ные выражения, полученные ранее в разд. 7.3, справедливы и для рассматриваемых условий с учетом ряда особенностей:

- емкостные сопротивления воздушных и кабельных линий существенно превышают активные и индуктивные сопротивления элементов схемы, что позволяет последними пренебречь;
- поскольку токи КЗ малы, можно считать, что напряжение источника остается неизменным.

Для получения расчетных выражений обратимся к простейшей схеме (рис. 9.2, а) и комплексной схеме замещения (рис. 9.2, б). Здесь, помимо емкостного сопротивления воздушной линии, символически введено индуктивное сопротивление этой ВЛ и трансформатора для всех последовательностей, хотя, как отмечалось выше, эти сопротивления незначительны и принимаются равными нулю.

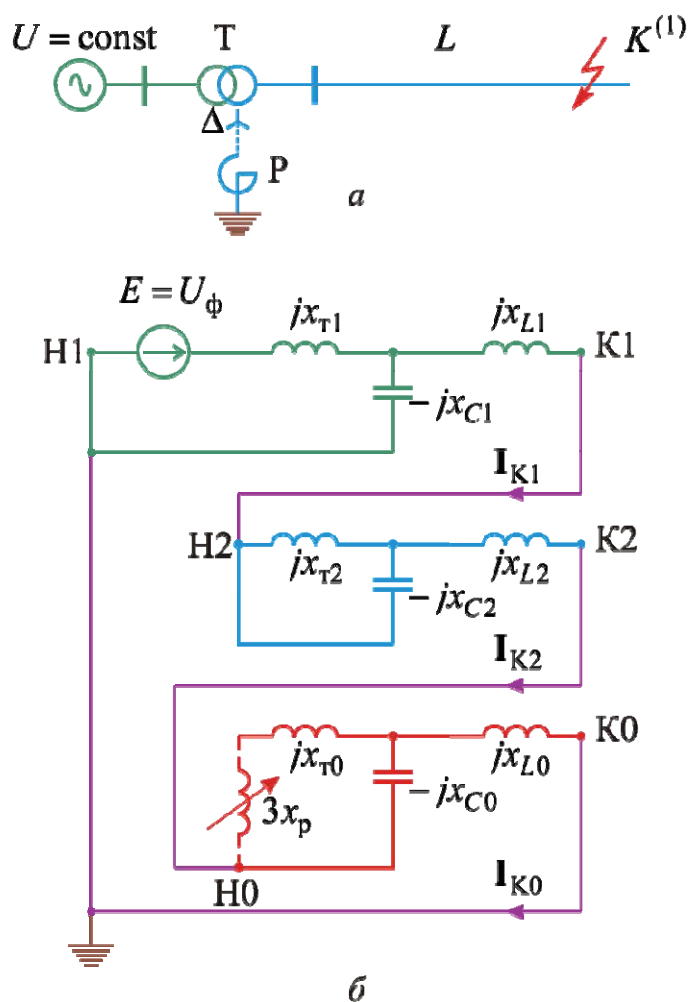


Рис. 9.2. Простое замыкание на землю: а – принципиальная схема; б – комплексная схема замещения

Поскольку в схемах прямой и обратной последовательностей емкостные сопротивления ВЛ (x_{C1}, x_{C2}) зашунтированы малыми сопротивлениями трансформатора ($x_{T1} = x_{T2} \approx 0$), то это позволяет принять $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = 0$. Считая реактор в нейтрали трансформатора отсутствующим (показан пунктиром), имеем $x_{0\Sigma} = -x_{C0\Sigma}$.

При принятых условиях, в соответствии с соотношениями (7.16) и (7.17), ток при металлическом замыкании на землю будет определяться выражением

$$\mathbf{I}_3 = \frac{3\mathbf{U}_{\text{ф.ср}}}{-jx_{C0\Sigma}} = 3\mathbf{U}_{\text{ф.ср}}j\omega C_{0\Sigma}, \quad (9.1)$$

где $x_{C0\Sigma}$ – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности воздушных и кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания; $U_{\text{ф.ср}}$ – среднее фазное напряжение ступени КЗ.

Как следует из (9.1), ток простого замыкания равен утроенной величине емкостного тока одной фазы в нормальных условиях. Поэтому распределительные сети 6...35 кВ называются сетями с малыми токами замыкания.

В практических расчетах возможна грубая оценка величины тока замыкания на землю по выражению

$$I_3 = \frac{\sqrt{3} U_{\text{ф.ср}}}{N} L = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{N} L \text{ (А)},$$

где $U_{\text{ср.ном}}$ – среднее номинальное напряжение ступени КЗ, кВ; N – коэффициент, принимаемый для воздушных линий равным 350, 10 – для кабельных; L – суммарная длина воздушных или кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания на землю, км.

Отметим, что величина тока замыкания практически не зависит от места замыкания и определяется суммарным сопротивлением (длиной) линий, электрически связанных с точкой замыкания.

Для симметричных составляющих напряжений, в соответствии с принятыми допущениями, имеем:

$$\mathbf{U}_{Ka1} = \mathbf{E}_{\Sigma} - \mathbf{I}_{Ka1} jx_{1\Sigma} = \mathbf{U}_{\text{ф}}; \quad (9.2)$$

$$\mathbf{U}_{Ka2} = 0 - \mathbf{I}_{Ka2} jx_{2\Sigma} \cong 0; \quad (9.3)$$

$$\mathbf{U}_{K0} = 0 - \mathbf{I}_{K0} jx_{0\Sigma} = \frac{jx_{C0\Sigma}}{-jx_{C0\Sigma}} \mathbf{U}_{\text{ф}} = -\mathbf{U}_{\text{ф}}. \quad (9.4)$$

На рис. 9.3 приведены векторные диаграммы напряжений и токов в месте простого замыкания на землю фазы A . Они построены с учетом ранее принятых допущений, при которых

$$U_{Ka1} = U_{\phi}, U_{Ka2} \cong 0, U_{K0} = -U_{\phi}.$$

Векторы U_{a1} , U_{b1} , U_{c1} образуют симметричную «звезду» напряжений нормального режима. Геометрическая сумма этих векторов с вектором нулевой последовательности дает фазные напряжения. Как следует из диаграммы, в режиме КЗ фазные напряжения неповрежденных фаз B и C увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз, принимая значение межфазного напряжения. При этом «треугольник» линейных напряжений остается без изменений, как и в нормальном режиме, и перемещается в соответствии с перемещением центра тяжести, положение которого определяется напряжением нулевой последовательности. Благодаря неизменности «треугольника» линейных напряжений и возможен длительный эксплуатационный режим при простом замыкании.

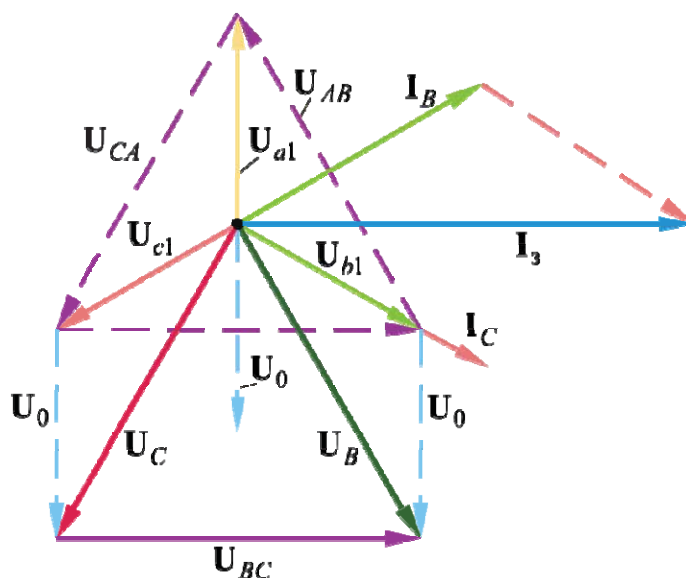


Рис. 9.3. Векторные диаграммы напряжений и токов в месте простого замыкания на землю

Емкостные токи здоровых фаз опережают их напряжения на 90° (рис. 9.3) и по модулю определяются так:

$$I_B = I_C = \sqrt{3}U_{\phi}\omega C_{0\Sigma}.$$

Ток земли представляет их геометрическую сумму и соответствует выражению (9.1).

9.3. Компенсация емкостного тока простого замыкания

При небольшой протяженности воздушных и кабельных линий ток замыкания фазы на землю в сетях 3...20 кВ составляет несколько ампер. Дуга при этих условиях оказывается неустойчивой и гаснет самостоятельно. Увеличение напряжения и протяженности сети приводит к росту тока замыкания на землю до десятков и сотен ампер. Дуга при таких токах может гореть длительно и переходить на соседние фазы, превращая однофазное замыкание в двух- или трехфазное. Надежная ликвидация дуги достигается за счет компенсации емкостного тока замыкания на землю посредством заземления нейтрали трансформатора через индуктивную катушку (показана пунктиром на схеме рис. 9.2). Величина индуктивности такой катушки выбирается так, чтобы в схеме нулевой последовательности возник резонанс токов. При этом $x_{0\Sigma} = \infty$, что приводит к полному исчезновению тока замыкания на землю. Пренебрегая индуктивными сопротивлениями трансформатора и линии, находим, что резонанс наступает при $x_p = x_{C0\Sigma}/3$. Благодаря реакторам ток однофазного замыкания снижается в десятки раз, что вполне достаточно для погашения дуги в месте замыкания.

В нормальном режиме сети из-за несимметрии фаз ВЛ всегда имеется небольшое смещение нейтрали, т. е. потенциал нейтрали отличен от нуля. Это смещение составляет 3...4 % фазного напряжения, что не представляет опасности. При включении дугогасящего реактора в нейтраль ее потенциал может существенно увеличиться. Для пояснения этого фактора обратимся к однолинейной схеме замещения сети, принципиальная схема которой представлена на рис. 9.4, а.

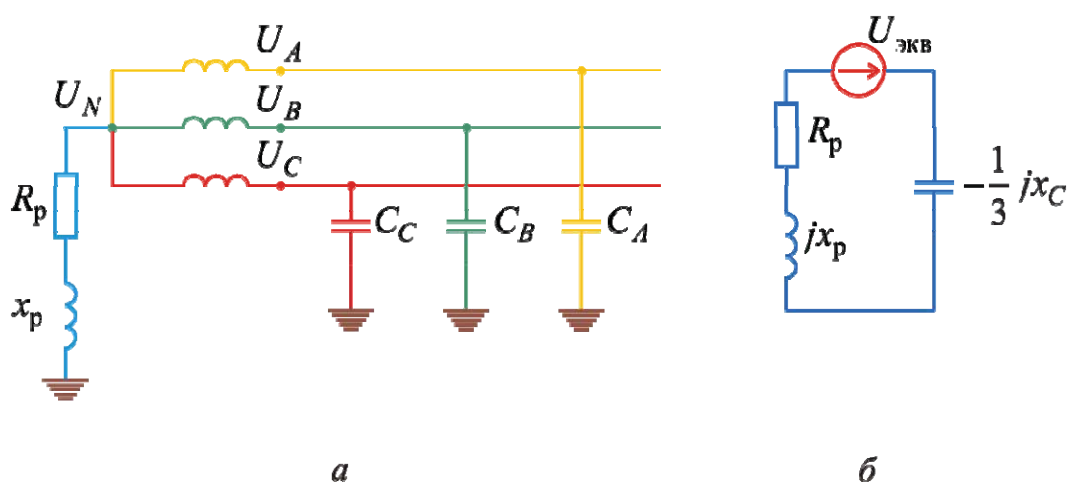


Рис. 9.4. К определению потенциала нейтрали: а – трехлинейная схема замещения; б – эквивалентная схема замещения

Напряжение нейтрали при отсутствии реактора определяется выражением

$$U_{N0} = U_{\text{экв}} = \frac{U_A b_A + U_B b_B + U_C b_C}{b_A + b_B + b_C},$$

где $b = j\omega C$ – проводимость фазы на землю.

При полной симметрии схемы, когда

$$U_A + U_B + U_C = 0 \text{ и } b_A = b_B = b_C,$$

потенциал нейтрали равен нулю ($U_{N0} = 0$).

При включенном реакторе на основе эквивалентной схемы замещения (см. рис. 9.4) потенциал нейтрали определится так:

$$U_{NP} = \frac{U_{\text{экв}}}{R_P + j\left(x_P - \frac{1}{3}x_C\right)} (R_P + jx_P) = \frac{U_{N0}(R_P + jx_P)}{R_P + j\left(x_P - \frac{1}{3}x_C\right)}. \quad (9.5)$$

При полной компенсации емкостных токов $x_P = x_C / 3$ и, учитывая, что в числителе (9.5) $R_P \ll x_P$, имеем

$$|U_{NP}| = U_{N0} \frac{x_P}{R_P}.$$

Как следует из этого выражения, при включенном реакторе потенциал нейтрали U_{NP} увеличивается в (x_P / R_P) раз по отношению к потенциалу U_{N0} при отсутствии реактора. Отношение x_P / R_P может достигать нескольких десятков единиц, вследствие чего потенциал нейтрали может превзойти фазное напряжение, что недопустимо.

Согласно (9.5) уменьшение потенциала нейтрали U_{NP} достигается либо уменьшением U_{N0} , либо расстройкой резонансного контура. С целью снижения U_{N0} в системе с резонансным заземлением нейтрали применяют транспозицию проводов для выравнивания емкостей фаз. Правила устройств электроустановок (ПУЭ) допускают различие емкостей фаз относительно земли в пределах 0,75 %. В сетях, не имеющих транспозицию, производят расстройку контура в сторону перекомпенсации. Дугогасящие реакторы имеют ступенчатое регулирование индуктивности, что позволяет производить их настройку под защищаемую сеть.

Согласно ПУЭ [10] компенсация емкостных токов замыкания на землю необходима при условии, что эти токи превышают допустимые, приведенные в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Допустимые токи и приближенная протяженность линий, соответствующая им

Напряжение сети, кВ	Допустимый ток замыкания, А	Допустимая протяженность сети, км	
		воздушной	кабельной
6	30	1600	47
10	20	660	35
35	10	95	2,6

Пример 9.1. Определить ток при простом металлическом замыкании на землю в сети 37 кВ, имеющей воздушные линии (ВЛ) общей протяженностью 200 км.

ВЛ: провод марки АС-95; расположение проводов по вершинам «треугольника» с расстояниями (м) $d_{AB} = 4,06$, $d_{AC} = 3,5$, $d_{BC} = 3,09$; высота подвеса проводов $h_A = h_C = 8$, $h_B = 11$.

При заданных параметрах линии (радиус провода $r = 6,75 \cdot 10^{-3}$ м) находим:

– среднее геометрическое расстояние между проводами:

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{4,06 \cdot 3,5 \cdot 3,09} = 3,53 \text{ м};$$

– средний геометрический радиус системы трех проводов:

$$R_{\text{ср}} = \sqrt[3]{6,75 \cdot 10^{-3} \cdot 3,53^2} = 0,44 \text{ м};$$

– среднее расстояние проводов A , B и C до их зеркальных отражений относительно земли:

$$D_i = 2 \cdot \frac{8 + 11 + 8}{3} = 18 \text{ м};$$

– емкостное сопротивление 1 км линии:

$$x_{C0} = 396 \left(\lg \frac{18}{0,44} \right) \cdot 10^3 = 636 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

– и, соответственно, емкостное сопротивление всей сети:

$$x_{C0\Sigma} = \frac{636}{200} \cdot 10^3 = 3180 \text{ Ом}.$$

Искомый ток замыкания на землю составляет по выражению (9.1)

$$I_3 = 3 \frac{37000}{\sqrt{3}(-j3180)} = j20 \text{ А}$$

и по приближенному выражению

$$I_3 = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{N} L = \frac{37 \cdot 200}{350} = 21 \text{ А.}$$

В данном случае для полной компенсации тока замыкания на землю необходимо в нейтраль обмотки 37 кВ трансформатора включить катушку с индуктивным сопротивлением

$$x_L = \frac{3180}{3} = 1060 \text{ Ом.}$$

9.4. Расчет токов короткого замыкания в установках до 1000 В

Достоверность расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В зависит главным образом от того, насколько правильно оценены и полно учтены все сопротивления короткозамкнутой цепи. Ниже отражены наиболее характерные особенности, подлежащие учету при расчете режима КЗ.

1. На величину тока КЗ существенно влияют активные и реактивные сопротивления таких элементов цепи, как:

- шины, кабели и провода длиной 10 м и более;
- токовые катушки расцепителей автоматических выключателей;
- первичные обмотки многовитковых трансформаторов тока.

Эти данные приведены в справочнике [8].

2. Переходные сопротивления подвижных контактов коммутационных аппаратов (автоматических выключателей, рубильников, разъединителей) также оказывают ощутимое влияние на ток КЗ. Учет суммарного сопротивления подвижных контактов осуществляется приближенно посредством введения в схему дополнительного активного сопротивления. Его значение изменяется в пределах 0,015...0,03 Ом и зависит от удаленности КЗ от шин питающей подстанции. Рекомендуются следующие значения переходного сопротивления:

- 0,015 Ом для распределительных устройств (РУ) подстанций;
- 0,02 Ом для первичных цеховых распределительных пунктов (РП);
- 0,025 Ом для вторичных цеховых РП;
- 0,03 Ом для КЗ непосредственно у электроприемников, получающих питание от вторичных РП.

3. В силу значительной удаленности сетей (до 1000 В) от системных источников питания напряжение на высшей стороне питающих трансформаторов 6/0,4; 10/0,4 кВ можно принимать неизменным, считая сопротивление внешней сети (x_c) равным нулю.

4. Асинхронные электродвигатели, подключенные к узлу сети, в котором произошло КЗ, или незначительно электрически удаленные от него, в схемах замещения учитываются активно – индуктивным сопротивлением и ЭДС, равной $E'' = 0,9U_{\text{НОМ}}$. При отсутствии каталожных данных сопротивления двигателей (мОм) определяются по эмпирическим выражениям:

$$r_M = \frac{0,63P_{\text{НОМ}} \cdot 10^6}{(I_{\text{п}}I_{\text{НОМ}})^2}, \quad x_M = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}{\sqrt{3}I_{\text{п}}I_{\text{НОМ}}}\right)^2 - r_M^2},$$

где $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность, кВт; $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток, кА; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение электродвигателя, кВ; $I_{\text{п}}$ – кратность пускового тока.

Подпитка точки КЗ электродвигателями учитывается при условии, что их суммарная мощность составляет более 20 % номинальной мощности питающего трансформатора.

5. В большинстве случаев в месте короткого замыкания возникает электрическая дуга, снижающая ток КЗ. Дуга учитывается активным сопротивлением, носит вероятностный характер и существенно усложняет расчет [14]. В тех случаях, когда требуется повышенная надежность установки, вычисление режима короткого замыкания осуществляется без учета сопротивления дуги. Аналогично поступают, когда завышенная величина токов короткого замыкания не меняет по существу технического решения.

6. Питание электроустановок до 1000 В осуществляется по радиальной схеме от трансформатора, у которого нейтраль обмотки низкого напряжения заземлена по условиям техники безопасности. Ток трехфазного короткого замыкания в рассматриваемых установках всегда больше тока однофазного КЗ. По току трехфазного короткого замыкания осуществляется выбор и проверка электротехнической аппаратуры; по току однофазного короткого замыкания – настройка защиты от замыканий на землю.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ рассчитывается по выражениям:

- при трехфазном КЗ

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}}, \text{ кА};$$

- при однофазном КЗ

$$I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3} U_{\text{ср.ном}} \cdot 10^3}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}, \text{ кА};$$

- при двухфазном КЗ

$$I_K^{(2)} \approx 0,87 I_K^{(3)}.$$

Здесь $U_{\text{ср.ном}}$ – среднее номинальное напряжение ступени сети, в которой произошло короткое замыкание, кВ; $r_{1\Sigma}, x_{1\Sigma}, r_{0\Sigma}, x_{0\Sigma}$ – суммарные сопротивления прямой и нулевой последовательностей (МОм) относительно точки КЗ.

Ударный ток от источника питания определяется по выражению

$$i_y = \sqrt{2} I_{\Pi} K_y.$$

При коротком замыкании на низшей стороне распределительного устройства комплектной трансформаторной подстанции принимают $K_y = 1,3$, а $K_y = 1$ – для всех остальных случаев, в том числе и от двигателей.

Пример 9.2

Для схемы, представленной на рис. 9.5, определить наибольшие и наименьшие значения токов при коротких замыканиях поочередно в точках К1 и К2.

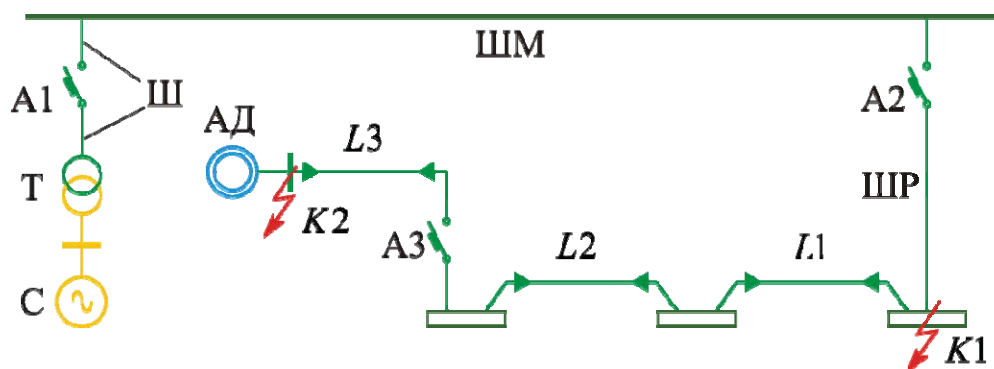


Рис. 9.5. Схема к примеру 9.2

Исходные данные

Трансформатор Т: 1000 кВА, 10/0,4 кВ, Y/Y₀ – 12.

Шины Ш: 3,5 м, А-2(80×8), расстояние между фазами –200 мм.

Шинопровод магистральный ШМ: 50 м, I_{НОМ} = 1600 А.

Шинопровод распределительный ШР: 4 м, I_{НОМ} = 600 А.

Кабели: L1 = 10 м, А(3 × 50 + 1 × 25); L2 = 8 м, А(3 × 35 + 1 × 16); L3 = 11 м, А(3 × 16 + 1 × 10); все кабели с алюминиевой оболочкой.

Автоматы: А1 – 1500 А; А2 – 600 А; А3 – 50 А.

Решение. Используя справочный материал прил., табл. ПЗ, П4, П6, находим сопротивления элементов заданной схемы:

- для трансформатора Т

$$r_1 = 1,7 \text{ мОм}, \quad x_1 = 8,6 \text{ мОм}, \quad r_0 = 0,9 \text{ мОм}, \quad x_0 = 80 \text{ мОм};$$

- для шины Ш

$$r_1 = 3,5 \cdot 0,034 = 0,12 \text{ мОм};$$

$$x_1 = 3,5 \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{1,26 \cdot 200}{0,23(80 + 24)} = 0,51 \text{ мОм};$$

$$r_0 = 10 \cdot 0,12 = 1,2 \text{ мОм}, \quad x_0 = 8,5 \cdot 0,51 = 44 \text{ мОм};$$

- для шинпровода ШМ

$$r_1 = 50 \cdot 0,034 = 1,7 \text{ мОм}, \quad x_1 = 50 \cdot 0,023 = 1,15 \text{ мОм};$$

- для нулевой последовательности примем:

$$r_0 \approx 10 \cdot r_1 = 17 \text{ мОм}; \quad x_0 \approx 10 \cdot x_1 = 11,5 \text{ мОм};$$

- для шинпровода ШР

$$r_1 = 4 \cdot 0,1 = 0,4 \text{ мОм}, \quad x_1 = 4 \cdot 0,1 = 0,4 \text{ мОм};$$

- для нулевой последовательности, аналогично предыдущему, имеем

$$r_0 = x_0 = 4 \text{ мОм};$$

- для кабелей

$$L1: r_1 = 10 \cdot 0,77 = 7,7 \text{ мОм}, \quad x_1 = 10 \cdot 0,068 = 0,68 \text{ мОм};$$

$$r_0 = 10 \cdot 1,4 = 14 \text{ мОм}, \quad x_0 = 10 \cdot 0,19 = 1,9 \text{ мОм};$$

$$L2: r_1 = 8 \cdot 1,1 = 8,8 \text{ мОм}, \quad x_1 = 8 \cdot 0,065 = 0,52 \text{ мОм};$$

$$r_0 = 8 \cdot 1,8 = 14,4 \text{ мОм}, \quad x_0 = 8 \cdot 0,23 = 1,84 \text{ мОм};$$

$$L3: r_1 = 11 \cdot 2,4 = 26,4 \text{ мОм}, \quad x_1 = 11 \cdot 0,084 = 0,92 \text{ мОм};$$

$$r_0 = 11 \cdot 3,5 = 38,5 \text{ мОм}, \quad x_0 = 11 \cdot 0,33 = 3,63 \text{ мОм};$$

- для автоматов

$$A1: r = x = 0;$$

$$A2: r = 0,12 \text{ мОм}, x = 0,09 \text{ мОм};$$

$$A3: r = 5,5 \text{ мОм}, x = 2,7 \text{ мОм}.$$

При коротком замыкании в точке $K1$ примем сопротивление контактных соединений $r = 20$ мОм. Следовательно, результирующие сопротивления схемы прямой (обратной) и нулевой последовательностей относительно точки $K1$ будут:

$$r_{1\Sigma} = 1,7 + 0,12 + 1,7 + 0,4 + 0,12 + 20 = 24 \text{ мОм};$$

$$x_{1\Sigma} = 8,6 + 0,51 + 1,15 + 0,4 + 0,09 = 10,75 \text{ мОм};$$

$$r_{0\Sigma} = 0,9 + 1,2 + 17 + 4 + 0,12 + 20 = 43,22 \text{ мОм};$$

$$x_{0\Sigma} = 80 + 4,4 + 11,5 + 4 + 0,09 = 100 \text{ мОм}.$$

Ток при трехфазном коротком замыкании составит

$$I_K^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{24^2 + 10,75^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 26,5} = 8,7 \text{ кА}$$

и при однофазном коротком замыкании

$$I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 24 + 43,22)^2 + (2 \cdot 10,75 + 100)^2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{152} = 4,55 \text{ кА}.$$

Без учета переходных сопротивлений контактных соединений эти токи существенно больше: $I_K^{(3)} = 20$ кА и $I_K^{(1)} = 5,5$ кА.

При $x/r = 10,75/24 = 0,45$ ударный коэффициент $K_y \approx 1$ и, следовательно, ударный ток

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 8,7 = 12,3 \text{ кА}.$$

При КЗ в точке $K2$ принимаем для контактных соединений $r = 30$ мОм, что дает такие результирующие сопротивления схемы:

$$r_{1\Sigma} = 24 + 7,7 + 8,8 + 26,4 + (30 - 20) + 5,5 = 82,4 \text{ мОм};$$

$$x_{1\Sigma} = 10,75 + 0,68 + 0,52 + 0,92 + 2,7 = 15,57 \text{ мОм};$$

$$r_{0\Sigma} = 43,22 + 14 + 14,4 + 38,5 + (30 - 20) + 5,5 = 125,5 \text{ мОм};$$

$$x_{0\Sigma} = 100 + 1,9 + 1,84 + 3,63 + 2,7 = 110 \text{ мОм}.$$

Находим значения токов:
для трехфазного короткого замыкания

$$I_K^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{82,4^2 + 15,57^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 83,8} = 2,75 \text{ кА}$$

и однофазного короткого замыкания

$$I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 82,4 + 125,5)^2 + (2 \cdot 15,57 + 110)^2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{324} = 2,14 \text{ кА.}$$

Без учета сопротивлений контактных соединений эти токи соответственно были бы следующие:

$$I_K^{(3)} = 4,05 \text{ кА и } I_K^{(1)} = 2,8 \text{ кА.}$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются особенности переходных процессов в сетях с изолированной нейтралью?
2. Почему однофазное КЗ на землю в сети с изолированной нейтралью может приниматься как «рабочий режим»?
3. Чем обусловлен тепловой спад тока короткого замыкания и при каких условиях необходим его учет?
4. Когда необходима компенсация тока однофазного короткого замыкания на землю и как она осуществляется?
5. При какой величине мощности двигательной нагрузки необходим ее учет в электроустановках до 1000 В?
6. В силу чего при $K^{(1)}$ в сетях с изолированной нейтралью можно пренебречь активно-индуктивным сопротивлением элементов схемы замещения?
7. Какова цель перекомпенсации емкостных токов при простом замыкании?
8. Каковы особенности расчета токов короткого замыкания в сетях до 1000 В?
9. Каков механизм учета переходных сопротивлений подвижных контактных соединений?
10. Для решения каких задач используются результаты расчета токов трехфазного и однофазного КЗ в электроустановках до 1000 В?

Глава 10

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

10.1. Постановка задачи

Токи короткого замыкания оказывают негативное влияние на электротехническую аппаратуру. Оно проявляется в виде:

– электродинамического воздействия, которое пропорционально ударному току КЗ;

– термического воздействия, которое оценивается по тепловому импульсу $B_k \equiv I_{\text{п}}^2 t_{\text{откл}}$, где $t_{\text{откл}}$ определяется временем действия средств релейной защиты ($t_{\text{рз}}$) и собственным временем отключения коммутационной аппаратуры ($t_{\text{ка}}$).

Снижение опасного воздействия КЗ сводится как к снижению уровня тока короткого замыкания, так и продолжительности его существования.

Анализ динамики статистических данных энергосистем по уровню токов КЗ [3] позволяет сделать следующие выводы:

1. Максимальные значения токов КЗ в сетях напряжением $U \geq 35$ кВ постоянно растут. Это вызвано развитием сети – вводом в эксплуатацию новых трансформаторов и линий электропередачи, что уменьшает суммарное сопротивление короткозамкнутой цепи: источник – точка КЗ.

2. В сетях напряжением 110 кВ ток однофазного КЗ практически равен току трехфазного. В сетях 220 кВ и выше токи однофазного КЗ превосходят токи трехфазного. Это обусловлено малыми значениями суммарного сопротивления нулевой последовательности, которое существенно зависит от числа и мест расположения заземленных нейтралей. Росту токов однофазного КЗ способствует ввод блоков турбогенераторов большой мощности (300...800 МВт), которые требуют, как правило, заземления нейтралей блочных трансформаторов. Тот же эффект дает широкое использование силовых автотрансформаторов, работающих с заземленными нейтралями. Частота однофазных КЗ существенно превышает частоту трехфазных, что в указанных условиях усложняет работу выключателей и сокращает их ресурс.

В связи с ростом уровней токов КЗ в последние годы стали весьма актуальными вопросы воздействия токов КЗ не только на жесткие шины, кабели и электрические аппараты, но и на генераторы, силовые трансформаторы, а также гибкие проводники электроустановок. Со-

гласно правилам устройств электроустановок гибкие шины распределительных устройств, а также провода воздушных ЛЭП должны проверяться на возможность схлестывания или опасного сближения в результате их раскачивания под воздействием электродинамических сил при $I_{\Pi}^{(3)} \geq 20$ кА, $i_y \geq 50$ кА.

Ограничению токов КЗ в энергосистемах всегда уделяется большое внимание. Для этого применяются как схемные решения, так и специальные устройства. Наиболее широко используются:

- оптимизация структуры и параметров сети;
- стационарное и автоматическое деление сети;
- токоограничивающие устройства;
- оптимизация режима заземления нейтралей в электрических сетях.

В зависимости от местных условий, требуемой степени ограничения токов, а также технико-экономических показателей используются различные средства, дающие наибольший эффект.

10.2. Оптимизация структуры сети (схемные решения)

Схемные решения принимаются, как правило, на стадии проектирования схем развития энергосистем, при этом выбираются оптимальные схемы выдачи мощности электростанций и параметры элементов сетей энергосистем. Динамика схемных решений исторически связана с укрупнением единичной мощности электростанций. Ввод в эксплуатацию генераторов мощностью 300...1200 МВт и укрупнение единичных мощностей электростанций до 3600...6400 МВт привели к вынужденному переходу от одной схемы, показанной на рис. 10.1, *а*, к другой (рис. 10.1, *б*), а затем к третьей (рис. 10.1, *в*).

При схеме (см. рис. 10.1, *а*), характерной для ТЭЦ с генераторами 30...100 МВт, возникают трудности с ограничениями токов короткого замыкания в сетях низшего и среднего напряжений.

Для схемы с блочными генераторами мощностью 100...300 МВт (см. рис. 10.1, *б*) наибольший рост токов КЗ наблюдается в сети среднего напряжения, меньший – в сети высшего напряжения; в сети же низшего напряжения уровень токов короткого замыкания стабилизируется.

В схеме на рис. 10.1, *в* с блочными генераторами 500...1200 МВт наибольший рост токов КЗ наблюдается в сетях высшего напряжения.

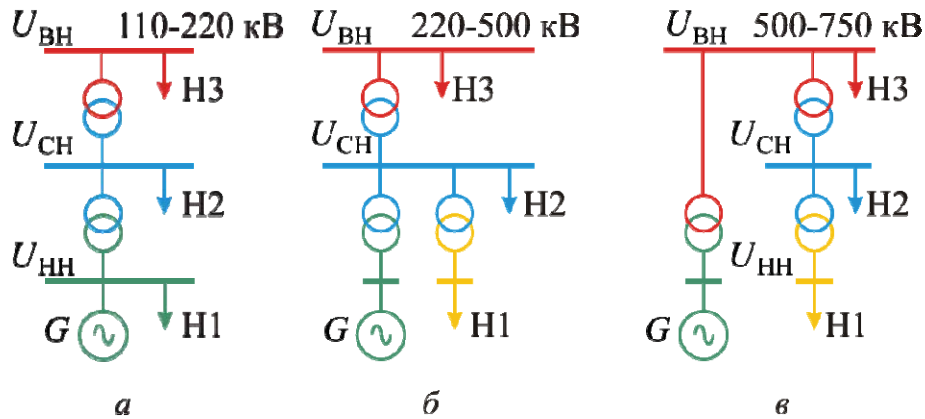


Рис. 10.1. Схемы выдачи мощности электростанций: а – ТЭЦ с генераторами 30–100 МВт; б – блочные станции с генераторами 100–300 МВт; в – блочные станции с генераторами 500–1200 МВт

Эффективным схемным решением по ограничению токов короткого замыкания в распределительных сетях среднего и низшего класса напряжений является оптимизация структуры системы электроснабжения. С этой целью реализуют периферийное (продольное) разделение сетей. Оно применяется для распределительных сетей одного класса напряжения, принадлежащих различным территориальным районам. Связь этих сетей через сеть повышенного напряжения (рис. 10.2, а) позволяет снизить уровень токов короткого замыкания.

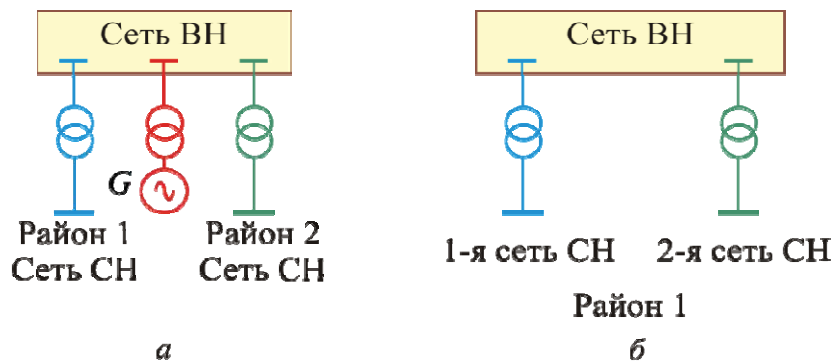


Рис. 10.2. Оптимизация структуры сети: а – периферийное (продольное) и б – местное (поперечное) разделение сети

Местное, или поперечное, разделение сетей (рис. 10.2, б) – это электроснабжение единого территориального района двумя и более распределительными сетями одного и того же класса напряжения с их связью через сеть повышенного напряжения. Данное решение позволяет стабилизировать уровень токов короткого замыкания при значительном росте электропотребления.

10.3. Стационарное или автоматическое деление сети

Деление сети применяют в процессе эксплуатации, когда требуется ограничить уровни токов КЗ при ее развитии. Различают деление сети стационарное (СДС) и автоматическое (АДС).

Стационарное деление сети осуществляется в нормальном режиме с помощью секционных, шиносоединительных или линейных выключателей. Оно производится тогда, когда уровень тока КЗ в узле сети превышает допустимые значения для параметров установленного оборудования. Пример деления сети на электростанции с двумя распределительными устройствами повышенного напряжения показан на рис. 8.3. Деление производится посредством разрыва трансформаторной связи между распределительными устройствами 220 и 110 кВ.

СДС оказывает существенное влияние на режимы, устойчивость и надежность работы электрической системы, а также на потери мощности в сетях.

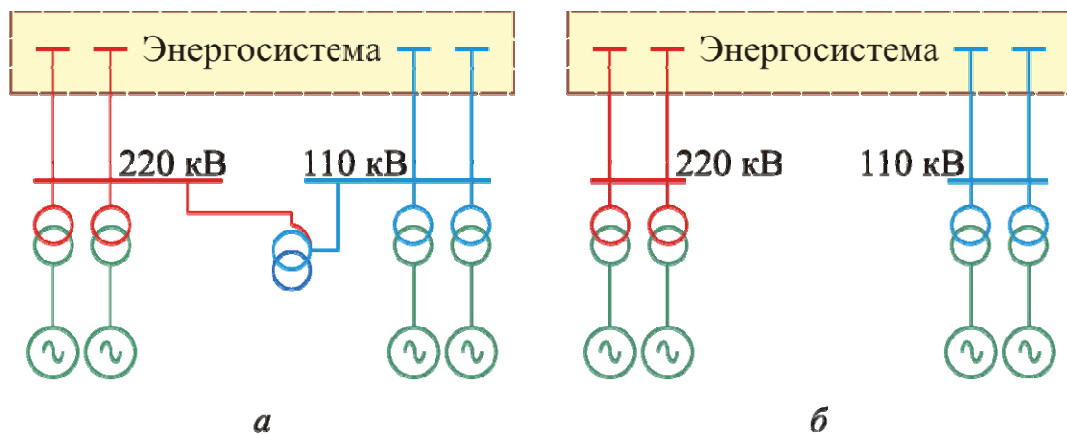


Рис. 10.3. Стационарное деление сети на электростанции с двумя РУ повышенного напряжения: а – исходная схема; б – разрыв автотрансформаторной связи между РУ двух классов напряжений

АДС производится в аварийном режиме для обеспечения работы коммутационных аппаратов. Оно осуществляется на секционных или шиносоединительных выключателях, иногда на выключателях мощных присоединений. При автоматическом делении сети образуется система каскадного отключения токов короткого замыкания, однако надо учитывать, что АДС имеет недостатки:

- 1) возможность появления в послеаварийном режиме значительных небалансов мощностей источников и нагрузки в разделившихся частях сети;
- 2) увеличение времени восстановления нормального режима.

Несмотря на это, устройства АДС широко применяются в энергосистемах, поскольку дешевы, просты и надежны.

10.4. Токоограничивающие устройства

Токоограничивающие устройства, выполняя свою основную функцию – ограничение токов КЗ, имеют стабильные характеристики при изменении схемы и параметров режима и не должны существенно влиять на нормальный режим работы сети.

Токоограничивающие реакторы, используемые в настоящее время в энергосистемах, являются нерегулируемыми и имеют линейную характеристику. В сетях 6 (10) кВ применяются одинарные и сдвоенные бетонные реакторы, а в сетях напряжением 35...220 кВ – одинарные с масляным охлаждением.

Паспортными параметрами реакторов являются: номинальное напряжение $U_{ном}$; номинальный ток $I_{ном}$; индуктивное сопротивление x_p (в Омах или процентах).

Возможные схемы включения реакторов приведены на рис. 10.4.

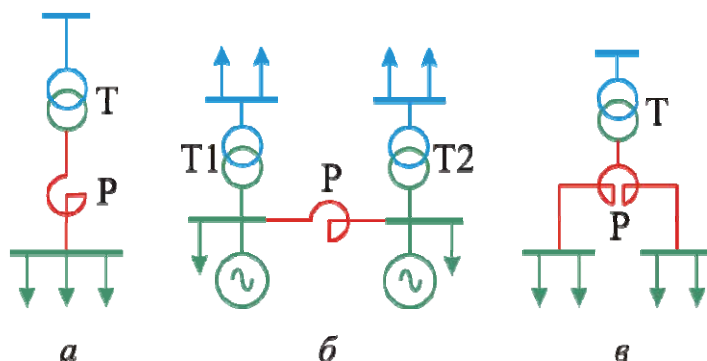


Рис. 10.4. Схемы включения реакторов:
а – линейного; б – секционного; в – сдвоенного

Линейный реактор, включаемый последовательно в линию (присоединение), ограничивает ток короткого замыкания и поддерживает относительно высокий уровень остаточного напряжения в узлах предвключенной сети. Последнее очень важно для электроприемников, подключенных по высшей стороне трансформатора. Однако в нормальном режиме имеют место потери активной и реактивной мощностей, а также падение напряжения.

Сопротивление реактора выбирается по желаемому уровню тока или мощности короткого замыкания за линейным реактором. Токоограничивающее действие реактора снижается с увеличением его номи-

нального тока, который должен соответствовать мощности электроприемников.

Секционные реакторы ограничивают ток короткого замыкания на сборных шинах и присоединениях. По сравнению с линейными реакторами они оказывают меньшее токоограничивающее действие. Это обусловлено тем, что секционные реакторы рассчитываются на большие номинальные токи, которые протекают между секциями при нарушении нормального режима.

В отношении потерь напряжения и реактивной мощности лучшими характеристиками обладают *сдвоенные реакторы*. В нормальном режиме магнитная связь между ветвями реактора уменьшает потерю напряжения в нем без снижения токоограничивающей способности. Коэффициент связи частей расщепленной обмотки определяется выражением

$$k_{св} = M / \sqrt{L_1 L_2} = \omega M / x_{НОМ},$$

где M – взаимная индуктивность ветвей обмотки; L_1, L_2 – собственные индуктивности ветвей.

Исходная схема сдвоенного реактора представляет трехлучевую «звезду» (рис. 10.5).

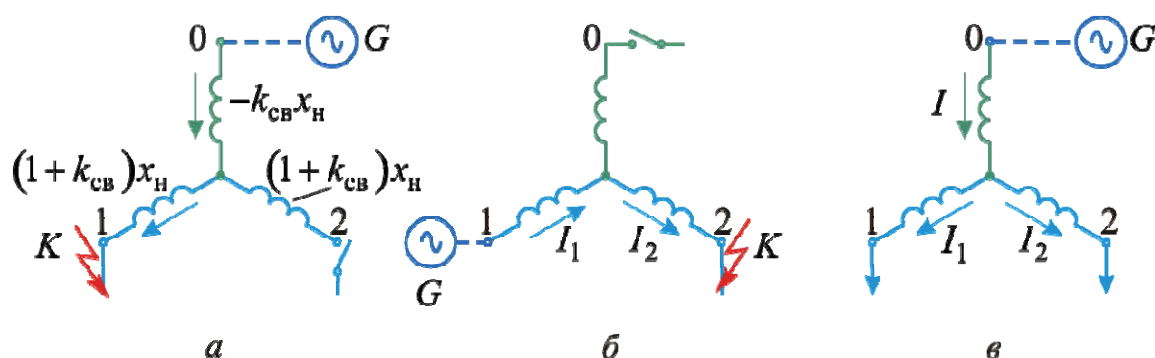


Рис. 10.5. Режимы работы сдвоенного реактора: а – одноцепной; б – продольный; в – двухцепной (сквозной)

В зависимости от схемы включения такой реактор работает в различных по токоограничению режимах, т. к. имеет различные результирующие сопротивления:

в одноцепном режиме (рис. 10.5, а)

$$x_P = (1 + k_{св})x_{НОМ} - k_{св}x_{НОМ} = x_{НОМ};$$

в продольном режиме (рис. 10.5, б)

$$x_P = 2(1 + k_{св})x_{НОМ};$$

в сквозном (двухцепном) режиме (см. рис. 10.5, в)

$$x_{\text{P}} = x_{\text{НОМ}} - k_{\text{СВ}}x_{\text{НОМ}} = (1 - k_{\text{СВ}})x_{\text{НОМ}}.$$

Недостатком сдвоенных реакторов является возможность повышения напряжения на слабо нагруженной ветви при работе в одноцепном и сквозном режимах (см. рис. 10.5, а, в) за счет магнитной связи частей обмотки реактора.

Реакторы с нелинейной характеристикой. К этой группе относятся управляемые и насыщающиеся реакторы.

Управляемый реактор – это регулируемый реактор со сталью, изменение сопротивления которого осуществляется подмагничиванием магнитопровода полем постоянного тока. В нормальном режиме сопротивление реактора снижается за счет подмагничивания. При КЗ сопротивление реактора увеличивается. Это увеличение характеризуется коэффициентом токоограничения, который составляет 4...7 единиц.

Насыщающийся реактор – это неуправляемый реактор со стальным магнитопроводом. Он имеет нелинейную характеристику $x_{\text{P}} = F(I_{\text{P}})$, которая определяется насыщением магнитопровода полем обмотки переменного тока. Эквивалентное сопротивление реактора возрастает с увеличением тока; это свойство реактора используется для ограничения тока короткого замыкания.

Токоограничивающие коммутационные аппараты ограничивают ток КЗ в течение первого полупериода его появления и далее отключают короткое замыкание. К ним относятся токоограничивающие предохранители и ограничители ударного тока взрывного действия.

Токоограничивающие предохранители изготавливаются на напряжение 3...35 кВ. Они отличаются простотой конструкции и небольшой стоимостью. Однако они имеют ряд существенных недостатков:

- одноразовое действие, что затрудняет применение автоматического повторного включения (АПВ);
- нестабильность токовременных характеристик;
- неуправляемость со стороны внешних устройств (релейной защиты), в связи с чем предохранители устанавливаются в цепях менее ответственных потребителей.

Ограничители ударного тока взрывного действия – это сверхбыстродействующие управляемые коммутационные аппараты одноразового действия. Конструктивно представляют собой герметизированный цилиндр, внутри которого располагается токоведущий проводник с пиропатроном. Отключение цепи осуществляется разрушением токоведущего проводника. Сигнал на срабатывание поступает от устройства релейной защиты, контролирующего ток короткого замыкания и его пер-

вую производную (скорость нарастания тока). Ограничение тока достигается за время порядка 0,5 мс; полное время отключения цепи составляет около 5 мс, т. е. 1/4 периода промышленной частоты.

Трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения применяются для снижения тока КЗ в сетях низкого напряжения. Повышающие трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения используются для формирования укрупненных блоков электростанций, особенно гидравлических (ГЭС), а понижающие применяются на подстанциях энергосистем и промышленных предприятий. Понижающие трансформаторы устанавливаются также в системе собственных нужд мощных тепловых и атомных электростанций. Характерные схемы соединения указанных трансформаторов приведены на рис. 10.6.

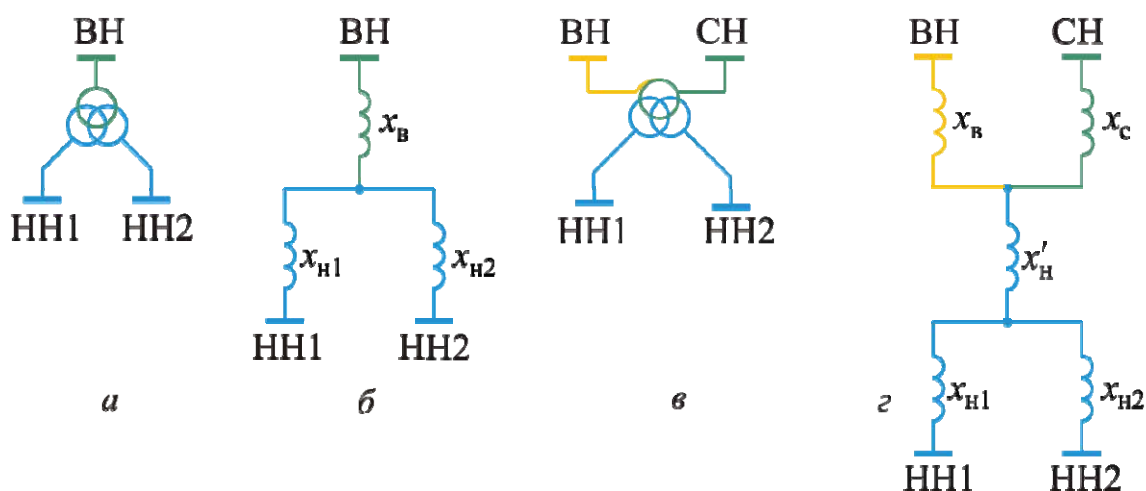


Рис. 10.6. Типовые схемы трансформаторов и автотрансформаторов с расщепленной обмоткой НН: а – принципиальная схема; б – схема замещения трансформатора; в и г – то же автотрансформатора

Характерными параметрами трансформатора с расщеплением обмотки НН на две являются (рис. 10.6, б):

- сопротивление расщепления ($x_{\text{расщ}}$), равное сопротивлению между выводами НН1–НН2;

- сквозное сопротивление ($x_{\text{скв}}$), равное сопротивлению между выводами ВН и объединенными выводами расщепленной обмотки НН1//НН2;

- коэффициент расщепления ($k_{\text{расщ}}$), определяемый по выражению

$$k_{\text{расщ}} = x_{\text{расщ}} / x_{\text{скв}} ;$$

– номинальная мощность ($S_{\text{ном}}$), номинальные напряжения ($U_{(В)\text{ном}}$, $U_{(Н)\text{ном}}$) и напряжения короткого замыкания ($U_{K(В-Н)}$, $U'_{K(Н1-Н2)}$).

Кроме вышеупомянутых, известны и другие токоограничивающие устройства: резонансного, трансформаторного, реакторного-вентильного типов и др. Принцип действия этих устройств описан в работах [3,14].

10.5. Оптимизация режима заземления нейтралей в электрических сетях

Величина токов при коротких замыканиях на землю существенно зависит от результирующего сопротивления схемы нулевой последовательности ($x_{0\Sigma}$). Увеличение этого сопротивления приводит к уменьшению указанных токов. Практически величина $x_{0\Sigma}$ определяется количеством и местом расположения трансформаторов и автотрансформаторов с заземленной нейтралью. Разземление нейтралей всех трансформаторов позволяет получить максимальное значение $x_{0\Sigma}$, а токи КЗ на землю – наименьшими. Однако режим нейтрали трансформаторов определяет условия работы изоляции трансформаторов при коммутационных и атмосферных перенапряжениях, а также при возникновении в сети КЗ на землю. Поэтому возможность изменения режима заземления нейтралей ограничена рядом условий.

1. При КЗ на землю напряжение на неповрежденных фазах относительно земли возрастает. Степень увеличения напряжения характеризуется коэффициентом заземления сети $K_3 = U_{\phi-3}/U_{\text{ном}}$, где $U_{\phi-3}$ – напряжение фазы относительно земли. С целью снижения стоимости трансформаторы напряжением 110 кВ и выше делают с ослабленной изоляцией нейтрали. Из этих соображений сети 110 кВ и выше должны быть *эффективно заземлены*, т. е. таким образом, чтобы напряжение на неповрежденных фазах при коротком замыкании на землю в любой точке не превышало 80 % линейного напряжения сети ($1,4 U_{\phi.\text{ном}}$). Это условие связано с установкой в сетях так называемых 80 %-х разрядников. Оно выполняется, т. е. $K_3 = U_{\phi-3}/U_{\text{ном}} \leq 0,8$, если удовлетворяется условие $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma} \leq 4; 5$.

2. По условиям работы выключателей желательно, чтобы токи однофазного и двухфазного коротких замыканий на землю в любой точке сети не превышали тока трехфазного КЗ в этой же точке. Это требование выполняется, если результирующая реактивность схемы нулевой

последовательности больше результирующей реактивности схемы прямой последовательности ($x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma} \geq 1$).

Таким образом, при выборе режима заземления нейтралей силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше необходимо выполнять следующие условия:

- $I_K^{(1)}/I_K^{(3)} \leq 1$, $I_K^{(1.1)}/I_K^{(3)} \leq 1$;
- $K_3 = U_{ф-з}/U_{ном} \leq 0,8$, где K_3 – коэффициент заземления сети;
- $U_N \leq U_{Nдоп}$, где $U_{Nдоп}$ – допустимое напряжение на нейтрали трансформатора;
- $U_{Nимп} \leq U_{Nимп. доп}$, где $U_{Nимп. доп}$ – импульсное допустимое напряжение на нейтрали трансформатора при КЗ в сети.

При выполнении перечисленных условий ограничить ток КЗ на землю можно наиболее просто путем разземления нейтралей нескольких трансформаторов сети. Ограничения токов короткого замыкания можно добиться и включением в нейтрали силовых трансформаторов реакторов или резисторов. При одном и том же сопротивлении реакторы более существенно ограничивают ток короткого замыкания, чем резисторы. Однако реакторы утяжеляют условия работы изоляции нейтрали при атмосферных перенапряжениях. Резисторы, по сравнению с реакторами, обеспечивают большую скорость затухания апериодической составляющей тока КЗ.

10.6. Координация уровней токов КЗ

Координация уровней токов КЗ – это согласование их значений в различных узлах энергосистемы и приведение в соответствие с параметрами электрооборудования. Необходимость координации возникает при проектировании электроустановок (станций, подстанций, линий электропередачи и т. д.) или эксплуатации энергосистем.

При проектировании электроустановки цель координации состоит в выборе ее оптимальной схемы и связей с узловыми подстанциями энергосистемы. При этом должны учитываться возможные параметры электрооборудования, режимные ограничения, требования к устойчивости и надежности работы электроустановки. Для координации уровней токов КЗ используются указанные выше способы с учетом конкретных параметров электроустановок.

При эксплуатации энергосистемы координация уровней токов короткого замыкания осуществляется оперативным изменением схемы,

режимов работы и параметров основных элементов электрооборудования. В частности, используются:

- стационарное и автоматическое деление сети посредством секционных или шиносоединительных выключателей;
- разземление нейтралей трансформаторов, заземление нейтралей трансформаторов через резисторы или реакторы;
- токоограничивающие реакторы или трансформаторы с расщепленной обмоткой НН;
- коммутационные аппараты с улучшенными характеристиками.

Анализ координации токов короткого замыкания используется для обоснования модернизации существующего электрооборудования.

Пример 10.1

Сравнить режимы параллельной и разделительной работ трансформаторов ГПП (рис. 10.7, а) по значениям начального и ударного токов трехфазного КЗ на шинах НН в точке $I_K^{(3)}$.

Исходные данные

Система С: источник неизменного напряжения $U_C = 115$ кВ, $S_K = 200$ МВА – мощность $K^{(3)}$ в точке K_C .

Трансформаторы Т1, Т2: $U_{(В)ном} / U_{(Н)ном} = 115 / 10,5$ кВ;

$S_{ном} = 125$ МВА, $U_K = 11$ %.

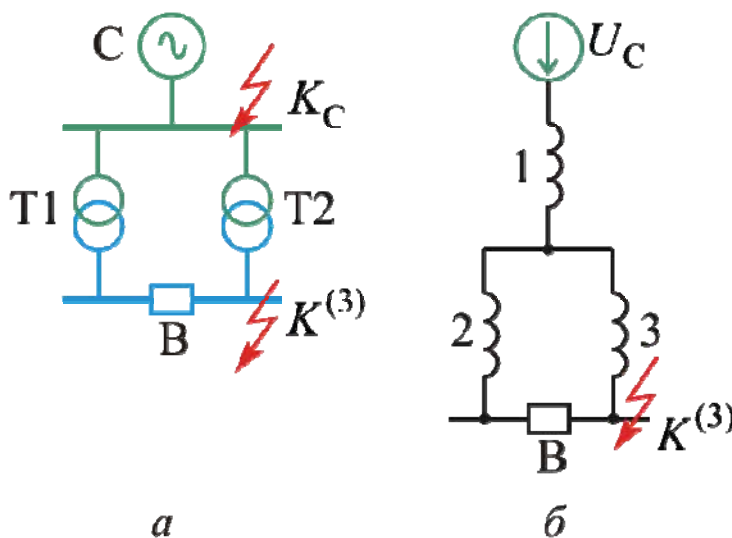


Рис. 10.7. Схемы к примеру 10.1: а – исходная схема; б – схема замещения

Решение. Принимаем базисные условия: $S_б = S_K = 2000$ МВА, $U_б = 10,5$ кВ. Находим базисный ток на ступени короткого замыкания:

$$I_{\delta} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 110 \text{ кА.}$$

Определяем сопротивления элементов схемы замещения (см. рис. 10.7, б) в относительных единицах:

$$x_{1*} = \frac{S_{\delta}}{S_K} = \frac{2000}{2000} = 1;$$

$$x_{2*} = x_{3*} = \frac{U_K S_{\delta}}{100 S_{\text{НОМ}}} = \frac{11 \cdot 2000}{100 \cdot 125} = 1,76.$$

Рассчитываем токи короткого замыкания:

- при параллельной работе трансформаторов (выключатель В включен)

$$I_{\Pi} = \frac{I_{\delta}}{x_{1*} + 0,5x_{2*}} = \frac{110}{1 + 0,5 \cdot 1,76} = 58,5 \text{ кА;}$$

$$i_y = K_y \sqrt{2} I_{\Pi} = 1,8 \sqrt{2} \cdot 58,5 = 149 \text{ кА;}$$

- при раздельной работе трансформатора (выключатель В отключен)

$$I_{\Pi} = \frac{I_{\delta}}{x_{1*} + x_{3*}} = \frac{110}{1 + 1,76} = 36,2 \text{ кА;}$$

$$i_y = 1,8 \sqrt{2} \cdot 36,2 = 92,2 \text{ кА.}$$

Переход с раздельной на параллельную работу трансформаторов ГПП вызывает повышение токов короткого замыкания на шинах НН на

$$\frac{58,5 - 36,2}{36,2} \cdot 100 = 62 \text{ \%}.$$

Пример 10.2

Для схемы, изображенной на рис. 10.8, а, выбрать параметры реактора напряжением 10 кВ для ограничения мощности короткого замыкания до 200 МВА на шинах 10 кВ. Мощность КЗ, обусловленная системой, при трехфазном КЗ на высшей стороне трансформатора в точке K_c составляет 3000 МВА. Параметры трансформатора: $S_{\text{НОМ}} = 40 \text{ МВА}$, $U_{(В)\text{НОМ}}/U_{(Н)\text{НОМ}} = 115/10,5 \text{ кВ}$, $U_K = 10,4 \text{ \%}$.

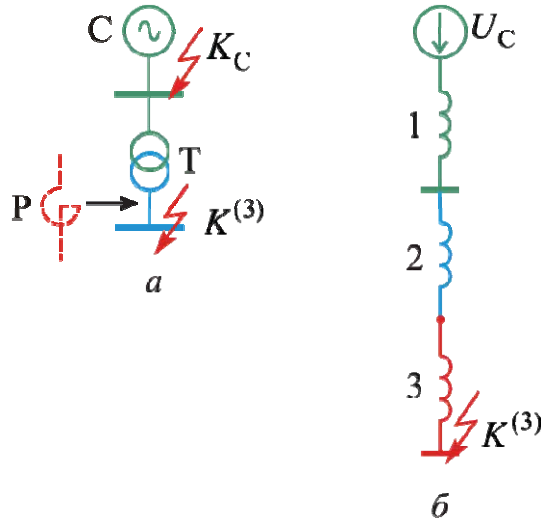


Рис. 10.8. Схемы к примеру 10.2:
a – исходная схема; *б* – схема замещения с учетом реактора

Решение. Принимаем за базисные следующие данные:
 $S_{\bar{6}} = 3000 \text{ МВА}$, $U_{\bar{6}} = 10,5 \text{ кВ}$, $I_{\bar{6}} = 3000 / (\sqrt{3} \cdot 10,5) = 165 \text{ кА}$.

Сопротивления системы и трансформатора в относительных единицах при принятых базисных условиях составляют:

$$x_{1*\bar{6}} = \frac{S_{\bar{6}}}{S_K} = \frac{3000}{3000} = 1, \quad x_{2*\bar{6}} = \frac{U_K \cdot S_{\bar{6}}}{100 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{10,4 \cdot 3000}{100 \cdot 40} = 7,8.$$

Определим требуемое сопротивление схемы (x_{Σ}) для ограничения мощности КЗ до заданного уровня в точке *K* (рис. 10.8, б):

$$x_{\Sigma*\bar{6}} = \frac{S_{\bar{6}}}{S_K} = \frac{3000}{200} = 15$$

и реактивное сопротивление реактора при базисных условиях:

$$x_{3*\bar{6}} = x_{\Sigma*\bar{6}} - (x_{1*\bar{6}} + x_{2*\bar{6}}) = 15 - (1 + 7,8) = 6,2.$$

Используя выражение

$$x_{P*\bar{6}} = \frac{x_{P\%} U_{\text{ном}} I_{\bar{6}}}{100 \cdot U_{\bar{6}} I_{\text{ном}}} = x_{3*\bar{6}}, \quad (10.1)$$

находим реактанс реактора, приведенный к его номинальным условиям:

$$x_P = \frac{x_{P*\bar{6}} 100 U_{\bar{6}} \cdot I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} I_{\bar{6}}} = \frac{6,2 \cdot 100 \cdot 10,5 \cdot 2,31}{10 \cdot 165} = 9,11 \%,$$

где номинальный ток реактора принят равным номинальному току трансформатора при $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$, т. е.

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 10} = 2,31 \text{ кА.}$$

Реактанс реактора в Омах составляет

$$x_{\text{P}} = \frac{x_{\text{P}\%} U_{\text{НОМ}}}{100 \cdot \sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} = \frac{9,11 \cdot 10}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 2,31} = 0,228 \text{ Ом.}$$

Этим данным соответствует реактор РБА 10-3000-12 с параметрами:

$$U_{\text{НОМ}} = 10 \text{ кВ, } I_{\text{НОМ}} = 3000 \text{ А, } x_{\text{P}} = 12 \% \text{ (} x_{\text{P}} = 0,23 \text{ Ом),}$$

который, согласно выражению (10.1), имеет реактивность

$$x_{\text{P}*\delta} = \frac{12 \cdot 10 \cdot 165}{100 \cdot 10,5 \cdot 3} = 6,29,$$

приведенную к общим базисным условиям.

Фактическая мощность короткого замыкания за этим реактором составляет

$$S_{\text{K}} = \frac{S_{\delta}}{x_{\text{рез}*\delta}} = \frac{3000}{(1 + 7,8 + 6,29)} = 199 \text{ МВА.}$$

Пример 10.3. Сравнить начальные значения токов трехфазного КЗ в равноценных по пропускной способности схемах электроснабжения (рис. 10.9, а, б).

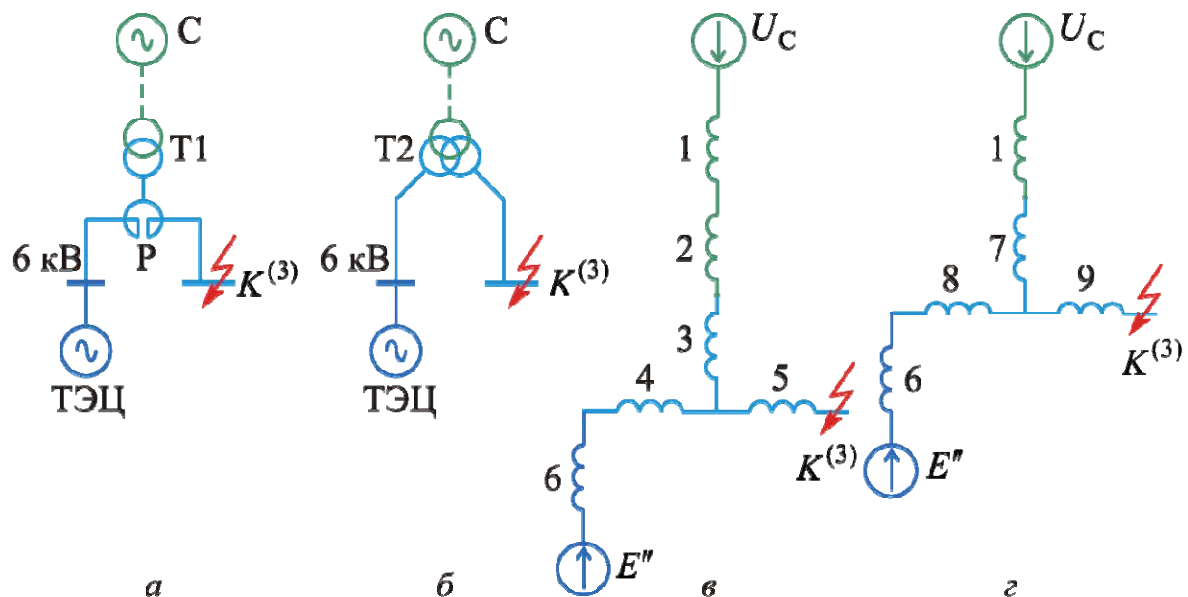


Рис. 10.9. Схемы к примеру 10.3: а – исходная схема 1, и в – ее схема замещения; б – исходная схема 2, и г – ее схема замещения

Исходные данные

Система С: источник неизменного напряжения – $U_C = 1$, ее мощность трехфазного короткого замыкания $S_K = 2000$ МВА.

Трансформатор Т1: $S_{НОМ} = 32$ МВА, $U_K = 10$ %.

Трансформатор Т2: $S_{НОМ} = 32$ МВА, $U_{K(B-H)} = 10$ %;

$U_{K(H-H)} = 33$ %.

Реактор сдвоенный Р: $U_{НОМ} = 10$ кВ, $I_{НОМ} = 2 \times 2000$ А, $x_P = 12$ %; $k_{CB} = 0,55$.

Генератор ТЭС: $S_{\SigmaНОМ} = 150$ МВА, $x_d'' = 0,21$, $E'' = 1,08$.

Решение. Расчет выполняем в относительных единицах при базисных условиях:

$$S_{\bar{6}} = 1000 \text{ МВА}, U_{\bar{6}} = 6,3 \text{ кВ}, I_{\bar{6}} = 1000 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 91,6 \text{ кА}.$$

Находим сопротивления элементов обеих схем замещения (см. рис. 10.9, в, з):

$$x_{1*} = \frac{S_{\bar{6}}}{S_K} = \frac{1000}{2000} = 0,5; \quad x_{2*} = \frac{U_K S_{\bar{6}}}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{10 \cdot 1000}{100 \cdot 32} = 3,13;$$

$$x_{3*} = -k_{CB} \frac{x_P U_{НОМ} I_{\bar{6}}}{100 \cdot U_{\bar{6}} I_{НОМ}} = -\frac{0,55 \cdot 12 \cdot 10 \cdot 91,6}{100 \cdot 10,5 \cdot 2} = -2,88;$$

$$x_{4*} = x_{5*} = (1 + k_{CB}) \frac{x_P U_{НОМ} I_{\bar{6}}}{100 \cdot U_{\bar{6}} I_{НОМ}} = (1 + 0,55) \frac{12 \cdot 10 \cdot 91,6}{100 \cdot 10,5 \cdot 2} = 8,11;$$

$$x_{6*} = x_d'' \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\SigmaНОМ}} = 0,21 \frac{1000}{150} = 1,4;$$

$$x_{7*} = U_{K(B-H)} \left(1 - \frac{U_{K(H-H)}}{2n U_{K(B-H)}} \right) \frac{S_{\bar{6}}}{100 S_{НОМ}} = 10 \left(1 - \frac{33}{2 \cdot 2 \cdot 10} \right) \frac{1000}{100 \cdot 32} = 0,55;$$

$$x_{8*} = x_{9*} = \frac{U_{K(H-H)}}{100 \cdot 2} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{НОМ}} = \frac{33 \cdot 1000}{10 \cdot 2 \cdot 32} = 5,2.$$

Параметры упрощенных схем замещения

- со сдвоенным реактором:

$$x_{10*} = x_{1*} + x_{2*} + x_{3*} = 0,75; \quad x_{11*} = x_{4*} + x_{6*} = 9,51;$$

$$x_{12*} = x_{10*} // x_{11*} + x_{5*} = 8,805; \quad E_{1\Sigma} = \frac{U_C x_{11*} + E'' x_{10*}}{x_{10*} + x_{11*}} = 1,006;$$

- с трансформатором, имеющим расщепленную обмотку:

$$x_{13*} = x_{1*} + x_{7*} = 1,05; \quad x_{14*} = x_{6*} + x_{8*} = 6,6;$$

$$x_{15*} = x_{13*} // x_{14*} + x_{9*} = 6,1; \quad E_{2\Sigma} = 1,01.$$

Начальные значения токов трехфазного короткого замыкания:
для схемы со сдвоенным реактором

$$I_P = \frac{E_{1\Sigma}}{x_{12*}} I_G = \frac{1,006 \cdot 91,6}{8,805} = 10,5 \text{ кА};$$

для схемы с трансформатором

$$I_T = \frac{E_{2\Sigma}}{x_{15*}} I_G = \frac{1,01 \cdot 91,6}{6,1} = 15,1 \text{ кА}.$$

Эффективность токоограничения схемы со сдвоенным реактором составляет

$$\frac{I_T - I_P}{I_P} 100 = \frac{15,1 - 10,5}{10,5} 100 = 43,8 \text{ \%}.$$

Контрольные вопросы

1. Чем обусловлен рост уровней токов короткого замыкания в энергосистемах?
2. Какие технические средства и решения применяются для ограничения токов КЗ?
3. Какие условия лежат в основе оптимизации режима заземления нейтралей в электрических сетях?
4. Что понимается под координацией уровней токов короткого замыкания?
5. Каковы общие требования к токоограничивающим устройствам?
6. Чем вызвана необходимость эффективного заземления нейтралей трансформаторов в электрических сетях при $U_{ном}$ 110 кВ и выше?
7. Что характеризует коэффициент заземления сети и какими параметрами он определяется?
8. Из каких соображений производится расщепление обмотки низшего напряжения трансформаторов и автотрансформаторов?
9. Что определяет преимущества и недостатки токоограничивающих предохранителей?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
2. Борисов Р.И., Готман В.И. Основы переходных процессов в электрических системах. – Томск: Изд-во ТПУ, 1969. – 388 с.
3. Неклепаев Б.Н. Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах. – М.: Энергия, 1978. – 152 с.
4. Ульянов С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах. – М.: Энергия, 1968. – 496 с.
5. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ; М.: Мир: АСТ, 2003. – 283 с.
6. Щедрин Н.Н., Ульянов С.А. Задачи по расчету коротких замыканий. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1955. – 230 с.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л.Г. Мамиконянца. – М.: Энергоиздат, 1985. – 216 с.
8. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: ЭАИ, 1990. – 576 с.
9. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. – М.: Энергоиздат, 1989. – 768 с.
10. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – М.: Энергоиздат, 1986. – 648 с.
11. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1964. – 640 с.
12. Крючков И.П. и др. Переходные процессы в электроэнергетических системах / под ред. И.П. Крючкова. – 2-е изд., стереотип. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 416 с.
13. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
14. Крючков И.П., Неклепаев Б.Н. и др. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 416 с.
15. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.

Приложение

Справочные данные по расчету токов КЗ в установках до 1000 В

Таблица 1

Ориентировочные значения сопротивлений первичных обмоток катушечных трансформаторов тока напряжением ниже 1 кВ

Коэффициент трансформации трансформаторов тока	Значение сопротивлений, мОм, для трансформатора тока класса точности			
	<i>x</i>	<i>r</i>	<i>x</i>	<i>r</i>
	1		2	
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	13
100/5	1,7	2,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,09
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05

Таблица 2

Электрическое сопротивление первичных обмоток трансформаторов тока типа ТКФ, мкОм

$I_{НОМ}, А$	ТКФ-1		ТКФ-3	
	<i>r</i>	<i>x</i>	<i>r</i>	<i>x</i>
7,5	$300 \cdot 10^3$	$480 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^3$	$120 \cdot 10^3$
10	$170 \cdot 10^3$	$270 \cdot 10^3$	$75 \cdot 10^3$	$70 \cdot 10^3$
15	$75 \cdot 10^3$	$120 \cdot 10^3$	$33 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$
20	$42 \cdot 10^3$	$67 \cdot 10^3$	$19 \cdot 10^3$	$17 \cdot 10^3$
30	$20 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	8200	8000
40	$11 \cdot 10^3$	$17 \cdot 10^3$	4800	4200
50	7000	$11 \cdot 10^3$	3000	2800
75	3000	4800	1300	1200
100	1700	2700	750	700
150	750	1200	330	300
200	420	670	190	170
300	200	300	80	80
400	110	170	50	40

Сопроотивления понижающих трансформаторов с вторичным напряжением 0,4 кВ

Номинальная мощность, кВа	Схема соединения обмоток	U_K , %	Значения сопротивлений, мОм										
			прямой последовательности				нулевой последовательности			току однофазного КЗ			
			r_{1T}	x_{1T}	z_{1T}	r_{0T}	x_{0T}	$r_T^{(1)}$	$x_T^{(1)}$	$z_T^{(1)}$			
25	Y/Y ₀	4,5	154	244	287	1650	1930	1968	2418	3110			
25	Y/Z ₀	4,7	177	243	302	73	35,4	–	–	–			
40	Y/Y ₀	4,5	88	157	180	952	1269	1128	1583	1944			
40	Y/Z ₀	4,7	100	159	18	44	13,4	–	–	–			
63	Y/Y ₀	4,5	52	102	114	504	873	608	1077	1237			
63	Y/Z ₀	4,7	59	105	119	28	12	–	–	–			
100	Y/Y ₀	4,5	31,5	65	72	254	582	317	712	779			
100	Y/Z ₀	4,7	36,3	65,7	75	15,6	10,6	–	–	–			
160	Y/Y ₀	4,5	16,6	41,7	45	151	367	184	450	486			
160	Δ/Y ₀	4,5	16,6	41,7	45	16,6	41,7	49,8	125	135			
250	Y/Y ₀	4,5	9,4	27,7	28,7	96,5	235	115	298	311			
250	Δ/Y ₀	4,5	9,4	27,2	28,7	9,4	27,2	28,2	81,6	86,3			
400	Y/Y ₀	4,5	5,5	17,1	18	55,6	149	66,6	183	195			
400	Δ/Y ₀	4,5	5,9	17	18	5,9	17	17,7	51	54			
630	Y/Y ₀	5,5	3,1	13,6	14	30,2	95,8	36,4	123	128			
630	Δ/Y ₀	5,5	3,4	13,5	14	3,4	13,5	10,2	40,5	42			
1000	Y/Y ₀	5,5	1,7	8,6	8,8	19,6	60,6	2,3	77,8	81			
1000	Δ/Y ₀	5,5	1,9	8,6	8,8	1,9	8,6	5,7	25,8	26,4			
1600	Y/Y ₀	5,5	1	5,4	5,5	16,3	50	18,3	60,8	63,5			
1600	Δ/Y ₀	5,5	1,1	5,4	5,5	1,1	5,4	3,3	16,2	16,5			
2550	Δ/Y ₀	5,5	0,64	3,46	3,52	0,64	3,46	1,92	10,38	10,56			

Таблица 4

Значения сопротивлений кабелей до 1 кВ

Сечение жилы, мм ²	Активное сопротивление при 20 °С жилы, мОм/м		Индуктивное сопротивление, мОм/м	
	алюминиевой	медной	кабеля с поясной бумажной изоляцией	трех проводов в трубе, кабеля с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией
1	–	18,5	–	0,133
1,5	–	12,3	–	0,126
2,5	12,5	7,4	0,104	0,116
4	7,81	4,63	0,095	0,107
6	5,21	3,09	0,09	0,1
10	3,12	1,84	0,073	0,099
16	1,95	1,16	0,0675	0,095
25	1,25	0,74	0,0662	0,091
35	0,894	0,53	0,0637	0,088
50	0,625	0,37	0,0625	0,085
70	0,447	0,256	0,612	0,082
95	0,329	0,195	0,0602	0,081
120	0,261	0,154	0,0602	0,08
150	0,208	0,124	0,0596	0,079
185	0,169	0,1	0,0596	0,078
240	0,13	0,077	0,0587	0,077

Таблица 5

Значение сопротивлений автоматических выключателей

$I_{\text{НОМ}}$, А	R_a , мОм	x_a , мОм	$I_{\text{НОМ}}$, А	R_a , мОм	x_a , мОм
50	7	4,5	600	0,41	0,13
70	3,5	2	1000	0,25	0,1
100	2,15	1,2	1600	0,14	0,08
140	1,3	0,7	2500	0,13	0,07
200	1,1	0,5	4000	0,1	0,05
400	0,65	0,17	–	–	–

Таблица 6

Значения сопротивлений комплектных шинопроводов, мОм

Параметры	ШМА68П		ШМА73		ШМА4		
	Номинальный ток, А	2500	4000	1600	1250	1600	2500
Сопротивление на фазу $R_{ш}$	0,02	0,013	0,031	0,034	0,03	0,017	0,015
Сопротивление на фазу $x_{ш}$	0,02	0,015	0,022	0,016	0,014	0,008	0,07
Номинальный ток, А	1600	250	400	630	250	400	630
Сопротивление на фазу $R_{ш}$	0,014	0,21	0,15	0,1	0,21	0,15	0,1
Сопротивление на фазу $x_{ш}$	0,006	0,221	0,17	0,13	0,21	0,17	0,13

Таблица 7

**Приближенные значения активных сопротивлений
разъемных контактов коммутационных аппаратов напряжением до 1 кВ**

Номинальный ток аппарата, А	Активное сопротивление, мОм	
	рубильника	разъединителя
50	–	–
70	–	–
100	0,5	–
150	–	–
200	0,4	–
400	0,2	0,2
600	0,15	0,15
1000	0,08	0,08
2000	–	0,03
3000	–	0,02

Учебное издание

ГОТМАН Владимир Иванович

**КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ
И НЕСИММЕТРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Учебное пособие

Научный редактор
*доктор технических наук,
профессор Ю.В. Хрущев*


Выпускающий редактор *Т.С. Савенкова*
Редактор *Е.А. Тетерина*
Компьютерная верстка и дизайн обложки
О.Ю. Аршинова

Подписано к печати 12.07.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 13,96. Уч.-изд. л. 12,62.
Заказ 1011-11. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru