

# Электромагнитные переходные процессы

Сергей Александрович Ульянов

1970



# Оглавление

<b>Предисловие</b>	<b>1</b>
<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>I Общие сведения и указания</b>	<b>7</b>
<b>1 Основные сведения об электромагнитных переходных процессах</b>	<b>9</b>
1.1 Основные определения . . . . .	9
1.2 Причины возникновения и следствия . . . . .	15
1.3 Назначения расчетов и требования к ним . . . . .	16
<b>2 Общие указания к выполнению расчетов</b>	<b>19</b>
2.1 Основные допущения . . . . .	19
2.2 Понятие о расчетных условиях . . . . .	20
2.3 Система относительных единиц . . . . .	21
2.4 Составление схемы замещения . . . . .	26
2.5 Преобразование схем замещения . . . . .	34
2.6 Применение принципа наложения . . . . .	36
2.7 Мощность короткого замыкания . . . . .	41
<b>II Электромагнитные переходные процессы при сохранении симметрии трехфазной цепи</b>	<b>43</b>
<b>3 Переходный процесс в простейших трехфазных цепях</b>	<b>45</b>
3.1 Постановка задачи и ее ограничения . . . . .	45
3.2 Трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи . . . . .	45
3.3 Действующие значения полных величин и их отдельных слагающих . . . . .	51
3.4 Приближенное решение . . . . .	53
3.5 Определение эквивалентной постоянной времени . . . . .	54
3.6 Графическое решение . . . . .	56
<b>4 Переходный процесс в неподвижных магнитосвязанных цепях</b>	<b>59</b>
4.1 Общие замечания . . . . .	59
4.2 Основные уравнения и соотношения . . . . .	59
4.3 Влияние рассеяния . . . . .	63
4.4 Приближенное решение . . . . .	65
4.5 Внезапное короткое замыкание трансформатора . . . . .	67

<b>5</b>	<b>Установившийся режим короткого замыкания</b>	<b>69</b>
5.1	Общие замечания . . . . .	69
5.2	Основные характеристики и параметры . . . . .	69
5.3	Приведение цепи ротора к статору . . . . .	69
5.4	Влияние и учет нагрузки . . . . .	69
5.5	Расчет при отсутствии автоматического регулирования возбуждения . . . . .	69
5.6	Влияние автоматического регулирования возбуждения . . . . .	69
5.7	Расчет при наличии автоматического регулирования возбуждения . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Начальный момент внезапного нарушения режима</b>	<b>71</b>
6.1	Общие замечания . . . . .	71
6.2	Переходные э. д. с. и реактивности синхронной машины . . . . .	72
6.3	Сверхпереходные э. д. с. и реактивности синхронной машины . . . . .	72
6.4	Сравнение реактивностей синхронной машины . . . . .	72
6.5	Характеристики двигателей и нагрузки . . . . .	72
6.6	Практический расчет начального сверхпереходного и ударного токов . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины</b>	<b>73</b>
7.1	Общие замечания и допущения . . . . .	73
7.2	Исходные уравнения . . . . .	74
7.3	Индуктивности обмоток синхронной машины . . . . .	74
7.4	Обобщенный вектор трехфазной системы . . . . .	74
7.5	Замена переменных . . . . .	74
7.6	Преобразование уравнений . . . . .	74
7.7	Выражения в операторной форме . . . . .	74
<b>8</b>	<b>Форсировка возбуждения и развозбуждение синхронной машины</b>	<b>75</b>
8.1	Общие замечания . . . . .	75
8.2	Включение обмотки возбуждения на постоянное напряжение . . . . .	76
8.3	Форсировка возбуждения при электромашином возбудителе . . . . .	76
8.4	Форсировка при управляемых ионных и тиристорных системах возбуждения . . . . .	76
8.5	Гашение магнитного поля . . . . .	76
<b>9</b>	<b>Внезапное короткое замыкание синхронной машины</b>	<b>77</b>
9.1	Общие замечания . . . . .	77
9.2	Внезапное короткое замыкание синхронной машины без демпферных обмоток . . . . .	77
9.3	Влияние и приближенный учет демпферных обмоток . . . . .	77
9.4	Влияние автоматического регулирования возбуждения при внезапном коротком замыкании . . . . .	78
9.5	Каскадное отключение и повторное включение короткого замыкания . . . . .	78
9.6	Взаимное электромагнитное влияние синхронных машин при переходном процессе . . . . .	78
<b>10</b>	<b>Практические методы расчета переходного процесса короткого замыкания</b>	<b>79</b>
10.1	Общие замечания . . . . .	79
10.2	Приближенный учет системы . . . . .	80
10.3	Расчет для выбора выключателей по отключающей способности . . . . .	80
10.4	Метод расчетных кривых . . . . .	80
10.5	Уточнение метода расчетных кривых . . . . .	80
10.6	Метод спрямленных характеристик . . . . .	80

### **III Электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии трехфазной цепи** **81**

<b>11 Основные положения в исследовании несимметричных переходных процессов</b>	<b>83</b>
11.1 Общие замечания . . . . .	83
11.2 Образование высших гармоник . . . . .	83
11.3 Применимость метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов . . . . .	83
<b>12 Параметры элементов для токов обратной и нулевой последовательностей</b>	<b>85</b>
12.1 Общие замечания . . . . .	85
12.2 Синхронные машины . . . . .	86
12.3 Асинхронные двигатели . . . . .	88
12.4 Обобщенная нагрузка . . . . .	88
12.5 Трансформаторы <sup>1</sup> . . . . .	89
12.6 Автотрансформаторы <sup>2</sup> . . . . .	92
12.7 Воздушные линии . . . . .	93
12.8 Кабели . . . . .	96
<b>13 Схемы отдельных последовательностей</b>	<b>97</b>
13.1 Общие замечания . . . . .	97
13.2 Схемы прямой и обратной последовательности . . . . .	97
13.3 Схема нулевой последовательности . . . . .	98
13.4 Результирующие э. д. с. и сопротивления . . . . .	99
13.5 Распределение и трансформация токов и напряжений . . . . .	100
<b>14 Однократная поперечная несимметрия</b>	<b>103</b>
14.1 Общие замечания . . . . .	103
14.2 Двухфазное короткое замыкание . . . . .	103
14.3 Однофазное короткое замыкание . . . . .	104
14.4 Двухфазное короткое замыкание на землю . . . . .	104
14.5 Учет переходного сопротивления в месте замыкания . . . . .	104
14.6 Правило эквивалентности прямой последовательности . . . . .	104
14.7 Комплексные схемы замещения . . . . .	104
14.8 Сравнение видов короткого замыкания . . . . .	104
14.9 Векторные диаграммы токов и напряжений . . . . .	104
14.10 Взаимное электромагнитное влияние синхронных машин при переходном процессе несимметричного короткого замыкания . . . . .	104
14.11 Применение практических методов к расчету переходного процесса при однократной поперечной несимметрии . . . . .	104
<b>15 Однократная продольная несимметрия</b>	<b>105</b>
15.1 Общие замечания . . . . .	105
15.2 Разрыв одной фазы . . . . .	105
15.3 Разрыв двух фаз . . . . .	105
15.4 Несимметрия от включения сопротивлений . . . . .	105
15.5 Правило эквивалентности прямой последовательности . . . . .	105
15.6 Комплексные схемы замещения . . . . .	105

<sup>1</sup> Для общности проводимых здесь записей обмотки трансформатора обозначены порядковыми номерами I, II, III вместо В, С, Н, как это обычно принято.

<sup>2</sup> См. сноску к § 12.5

15.7 Распределение напряжений . . . . .	105
15.8 Применение принципа наложения . . . . .	105

#### **IV Электромагнитные переходные процессы при особых условиях 107**

<b>16 Сложные виды повреждений</b>	<b>109</b>
16.1 Общие замечания . . . . .	109
16.2 Общий путь решения . . . . .	109
16.3 Комплексные схемы . . . . .	109
16.4 Двойные замыкания на землю . . . . .	109
16.5 Однофазное короткое замыкание с разрывом фазы . . . . .	109
<b>17 Замыкания в распределительных сетях и системах электроснабжения</b>	<b>111</b>
17.1 Общие замечания . . . . .	111
17.2 Простое замыкание на землю . . . . .	111
17.3 Учет изменения параметров проводников сети . . . . .	111
17.4 Учет местных источников и нагрузок . . . . .	111
17.5 Расчет токов короткого замыкания в установках напряжением до 1 000 в .	111
<b>18 Короткие замыкания в длинных линиях передачи переменного тока</b>	<b>113</b>
18.1 Общие замечания . . . . .	113
18.2 Расчет операторным методом . . . . .	113
18.3 Упрощенное решение . . . . .	113
18.4 Влияние несимметрии ротора . . . . .	113
<b>19 Влияние качаний синхронных машин на протекание электромагнитного переходного процесса</b>	<b>115</b>
19.1 Общие замечания . . . . .	115
19.2 Токи и напряжения при сдвиге векторов э. д. с. по фазе . . . . .	115
19.3 Дифференциальное уравнение изменения переходной э. д. с. с учетом качаний синхронной машины . . . . .	115
19.4 Приближенный учет качаний в расчетах коротких замыканий . . . . .	115
<b>Приложения</b>	<b>117</b>
<b>Литература</b>	<b>119</b>

# Предисловие

Предлагаемая книга является учебником по первой части курса «Переходные процессы в электрических системах», в которой рассматриваются только электромагнитные переходные процессы.

Она написана в соответствии с программой по данному курсу (инд. У-Т-3/160), утвержденной Учебно-методическим Управлением МВ и ССО СССР в 1968 г. для специальностей: «Электрические станции» (0301), «Электрические системы и сети» (0302) и «Кибернетика электрических систем» (0304). С некоторыми сокращениями она, очевидно, может быть использована и для других электротехнических специальностей и специализаций.

Весь материал книги разбит на четыре раздела; при этом в четвертый раздел отнесены гл. 16–19 которые между собой не связаны.

При построении книги автор опирался преимущественно на свой многолетний опыт преподавания данного курса в Московском ордена Ленина энергетическом институте. Следует отметить, что не весь материал подлежит изложению на лекциях. Так, например, содержание гл. 2 почти полностью целесообразно прорабатывать на практических занятиях. К тому же, это в сущности вынужденное решение, так как лектор не успевает, прочитать все, что нужно к первому практическому занятию.

В зависимости от местных условий и обстоятельств (как-то: наличие лаборатории по курсу и ее пропускной способности и пр.) в рабочем календарном плане иногда приходится менять порядок прохождения отдельных тем, добиваясь наибольшей согласованности с тематикой практических занятий и содержанием каждого этапа заданий, которые самостоятельно выполняют студенты. Для этого основы строгой теории переходных процессов и ее применение (гл. 7–9) лектор обычно вынужден излагать после практических методов расчета (гл. 10). Равным образом более подробное знакомство с гл. ?? приходится давать после гл. 14 и 15. Однако сделать такую перестановку в учебнике было бы неправильным, так как местные условия могут быть весьма различны, а кроме того, учебником пользуются учащиеся, которые не ограничены подобными рамками (например, студенты-заочники).

Несмотря на то что недавно вышел в свет сборник задач по данной части курса, автор не счел возможным ограничиться малым числом примеров. Все принципиальные вопросы и методы расчета в книге иллюстрированы необходимым количеством примеров, в которых приведены подробные решения.

Автор надеется, что эта книга найдет своих читателей также среди инженерно-технических работников и принесет им пользу в их практической деятельности.

При создании данной книги автор использовал не только свои работы, но также многочисленные работы по исследованию и расчету электромагнитных переходных процессов, выполненные в Советском Союзе: А. А. Горева, Н. Н. Щедрина, Д. А. Городского, Н. Ф. Марголина, Л. Г. Мамиконянца, И. М. Марковича, А. Б. Чернина и др. и за рубежом: Р. Рюденберга, К. Парка, Э. Кларк, К. Вагнера, Р. Эванса, Э. Кимбарка, К. Ковача, И. Раца и др. Поскольку книга предназначена для учебных целей, не представляется возможным всюду давать ссылки на первоисточники. Помещенный в конце книги перечень литературы ориентирован в основном на интересы и возможности студентов. Более полный, но далеко не исчерпывающий список литературы приведен в книге автора, изданной

в 1964 г. [1].

Автор выражает глубокую благодарность коллективу кафедры «Электрические станции, сети и системы» Рижского политехнического института и доктору техн. наук, проф. Н. И. Соколову за рецензирование рукописи и сделанные ими замечания и предложения, которые учтены при окончательной подготовке рукописи к печати.

С благодарностью автор отмечает большую работу канд. техн. наук, доц. И. П. Крюкова по тщательному редактированию рукописи.

Все замечания и пожелания по данной книге автор примет с (признательностью и просит их направлять в адрес издательства «Энергия» (Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10).

Москва, 1970

*С. А. Ульянов*



# Введение

Курс «Переходные процессы в электрических системах» является одним из профилирующих для электроэнергетических специальностей и специализаций.

Переходные процессы возникают в электрических системах как при нормальной эксплуатации (включение и отключение нагрузок, источников питания, отдельных цепей, производство испытаний и пр.), так и в аварийных условиях (обрыв нагруженной цепи или отдельной ее фазы, короткое замыкание, выпадение машины из синхронизма и т. д.). Их изучение, разумеется, не может быть самоцелью. Оно необходимо прежде всего для ясного представления причин возникновения и физической сущности этих процессов, а также для разработки практических критериев и методов их количественной оценки, с тем чтобы можно было предвидеть и заранее предотвратить опасные последствия таких процессов. Короче говоря, важно понимать переходные процессы, но еще важнее уметь сознательно управлять ими.

При любом переходном процессе происходит в той или иной мере изменение электромагнитного состояния элементов системы и нарушение баланса между моментом на валу каждой вращающейся машины и электромагнитным моментом.

В результате этого нарушения соответственно изменяются скорости вращения машин, т. е. некоторые машины испытывают торможение, в то время как другие — ускорение. Такое положение существует до тех пор, пока регулирующие устройства не восстановят нормальное состояние, если это вообще осуществимо при изменившихся условиях.

Из сказанного следует, что переходный процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в системе. Последние взаимно связаны и по существу представляют единое целое. Тем не менее благодаря довольно большой механической инерции вращающихся машин начальная стадия переходного процесса характеризуется преимущественно электромагнитными изменениями. В самом деле, вспомним хотя бы процесс пуска асинхронного двигателя. С момента включения его в сеть до момента начала разворота ротора двигателя имеет место только электромагнитный переходный процесс, который затем дополняется механическим переходным процессом. Процесс пуска двигателя значительно усложняется, если учесть возникающую реакцию источника питания и действие его автоматических регулирующих устройств.

При относительно малых возмущениях (например, при коротком замыкании за большим сопротивлением или, как говорят, при большой удаленности короткого замыкания) весь переходный процесс практически можно рассматривать только как электромагнитный. Для иллюстрации укажем, что в установке с напряжением 400 В ток короткого замыкания в 5000 А после его приведения к стороне генераторного напряжения составляет менее 1,5% номинального тока современного турбогенератора 200 Мвт (15,75 кВ). Естественно, такое малое увеличение тока не вызовет заметного нарушения равновесия рабочего состояния упомянутого турбогенератора.

Таким образом, при известных условиях представляется возможным и целесообразным рассматривать только одну сторону переходного процесса, а именно явления электромагнитного характера. В соответствии с этим настоящий курс разбит на две части. В первой

из них рассматриваются электромагнитные переходные процессы<sup>3</sup>, а во второй — совместно электромагнитные и механические, т. е. электромеханические переходные процессы. Такое деление помогает учащемуся постепенно осваивать разнообразный и достаточно сложный материал курса.

При прохождении курса «Теоретические основы электротехники» читатель уже знакомился с переходными процессами в цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами. Рассмотрение этих процессов проводилось в предположении, что цепь является однофазной и ее питание осуществляется от источника с заранее известным напряжением (как по величине, так и по закону его изменения). В данном курсе предстоит рассмотреть более сложные задачи, когда переходный процесс возникает в многофазной цепи, при этом он одновременно протекает в самих источниках питания, у которых дополнительно приходят в действие автоматические регулирующие устройства. В этом случае напряжения всех источников<sup>4</sup> являются неизвестными переменными величинами.

Преподавание в вузах этого курса как самостоятельной специальной дисциплины<sup>5</sup> началось в конце 20-х годов. За истекшее время его содержание и число часов, отводимое на него в учебных планах, неоднократно менялось. В последние годы установлена более тесная последовательная связь между его обеими частями.

Первая часть данного курса использует материал, изученный в курсах высшей математики (операционное исчисление), теоретических основ электротехники (линейные цепи), электрических машин (преимущественно синхронные и асинхронные машины) и электрических сетей и систем.

В свою очередь материал первой части данного курса используется при прохождении его второй части, а также при дальнейшем изучении других специальных курсов, как-то: электрических систем, дальних передач, основного электрооборудования станций, техники релейной защиты, автоматизации электрических систем и др.

Практические задачи, при решении которых инженер-электрик сталкивается с необходимостью количественной оценки тех или иных величин во время электромагнитного переходного процесса, многочисленны и разнообразны (см. §??). Однако все они в конечном итоге объединены единой целью обеспечить надежность работы отдельных элементов и электрической системы в целом.

Теперь сделаем небольшую экскурсию в прошлое и покажем вкратце как развивалась проблема переходных процессов преимущественно в части исследования электромагнитных переходных процессов.

В то время как теория установившихся режимов развивалась в правильном направлении и быстро приспособилась к нуждам практики, сущность переходных процессов долго оставалась невыясненной. На примере развития электромашиностроения нетрудно проследить, насколько важен учет явлений, в частности, при коротких замыканиях.

Первоначальные конструкции электрических машин выполнялись лишь в соответствии с требованиями нормальной работы. Пока мощности машин были малы, их конструкции обладали как бы естественным запасом устойчивости против механических и тепловых действий токов короткого замыкания. Однако такое положение существовало недолго. По мере роста мощности машин и особенно после осуществления их параллельной работы размер повреждений машин при коротких замыканиях резко возрос. Становилось очевидным, что нельзя обеспечить надежную конструкцию машины, не считаясь с аварийными условиями работы. Успех предлагаемых мер по усилению конструкций зависел от досто-

---

<sup>3</sup>В конце первой части рассматривается упрощенный учет качаний генераторов, что является естественным переходом ко второй части курса.

<sup>4</sup>За исключением тех, мощность которых практически может быть принята бесконечно большой.

<sup>5</sup>Точнее, двух дисциплин, так как вначале читались отдельно курс коротких замыканий и курс устойчивости электрических систем.

верности знаний самого процесса короткого замыкания. Так постепенно создавались все более совершенные конструкции электрических машин. В современном исполнении они являются одним из надежных элементов систем. Разумеется, эта надежность достигнута при учете и других опасных условий, в которых может оказаться машина.

Аналогичное положение наблюдалось при поисках способов гашения магнитного поля электрических машин. Недостаточность первоначальных сведений об этом процессе приводила к малоэффективным решениям. Подобные примеры можно обнаружить и в других областях электроэнергетики (аппаратостроении, технике релейной защиты и др.).

Более серьезная разработка теории переходных процессов в электрических машинах началась с первых лет текущего столетия. В конце 20-х годов Парк (Park) разработал строгую теорию переходных процессов в электрических машинах, приняв в основу ранее предложенную Блонделем (Blondel) теорию двух реакций. Эта теория обеспечила быстрое развитие дальнейших исследований в данной области. Они интенсивно проводились у нас в Союзе и за рубежом, главным образом в США. Особое место среди них занимают работы А. А. Горева.

Примерно в те же годы стала находить все более широкое применение теория симметричных составляющих, остававшаяся в течение нескольких лет без использования. Она позволила решить на строгой научной основе все вопросы, связанные с несимметрией в многофазной цепи.

Наряду с теоретическими исследованиями существенно важной являлась своевременная разработка практических методов расчета переходных процессов. В этом испытывалась острая нужда в связи с проводившейся широкой электрификацией нашей страны.

К выполнению таких работ привлекались научно-исследовательские и учебные институты (ВЭИ, МЭИ, ЛПИ, ХЭТИ и др.), крупные энергообъединения (Мосэнерго, Ленэнерго) и проектные организации (ТЭП). Для координации работ, обобщения результатов, подготовки решений и рекомендаций были созданы специальные комиссии. Так, в 30-х годах под председательством К. А. Круга работала комиссия по разработке указаний к выполнению расчетов коротких замыканий.

Теоретические исследования и практические методы расчета всегда требуют экспериментальной проверки. Ранее ее проводили в натуральных условиях. Однако испытания проводились крайне редко из-за значительного риска, что такой эксперимент повлечет серьезную аварию, поскольку системы не располагали достаточным резервом мощности, связи между станциями были слабы, отсутствовали многие автоматические устройства (как-то: регулирование возбуждения генераторов, повторное включение цепей и др.) и, наконец, само оборудование было еще недостаточно совершенным (например, время действия выключателей составляло десятые доли секунды). Позже и особенно в последнее время благодаря значительному усовершенствованию электрических систем подобные эксперименты проводят по мере надобности, причем, как правило, они не вызывают каких-либо заметных помех в нормальной работе системы. С той же целью используются записи автоматических осциллографов, которыми все больше оснащают наиболее ответственные и характерные цепи систем.

Неоценимую помощь в экспериментировании и проверке ряда новых теоретических разработок, схем и автоматических устройств оказало и продолжает оказывать физическое и математическое моделирование электрических систем. Применение электронных вычислительных машин непрерывного действия (машины-аналоги) и дискретного действия (цифровые машины) в значительной мере расширили возможности очень эффективного математического моделирования.

Расчетные модели, где все элементы системы (включая генераторы) представлены схемами замещения, уже свыше 35 лет широко используют для решения многих задач. В зависимости от их конструкции они позволяют получить решение в соответствии с

принятым методом расчета, почти полностью освобождая от утомительной и трудоемкой вычислительной работы, что также очень ценно.

По вопросам переходных процессов в электрических системах, их моделированию и практическим методам их расчета написано много книг. Лишь некоторые из них указаны в данном учебнике.

# **Часть I**

## **Общие сведения и указания**



# Глава 1

## Основные сведения об электромагнитных переходных процессах

### 1.1 Основные определения

Из всего многообразия электромагнитных переходных процессов в электрической системе наиболее распространенными являются процессы, вызванные:

1. включением и отключением двигателей и других приемников электроэнергии;
2. коротким замыканием в системе, а также повторным включением и отключением (одновременным или каскадным) короткозамкнутой цепи;
3. возникновением местной несимметрии в системе (например, отключение одной фазы линии передачи);
4. несинхронным включением синхронных машин.

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

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

При возникновении короткого замыкания в электрической системе сопротивление цепи уменьшается (степень уменьшения зависит от положения точки короткого замыкания в системе), что приводит к увеличению токов в отдельных ветвях системы по сравнению с токами нормального режима. В свою очередь это вызывает снижение напряжений в системе, которое особенно велико вблизи места короткого замыкания.

Обычно в месте замыкания образуется некоторое переходное сопротивление, состоящее из сопротивления возникшей электрической дуги и сопротивлений прочих элементов пути тока от одной фазы к другой или от фазы на землю. Электрическая дуга возникает или с самого начала происшедшего повреждения как, например, при перекрытии или пробое изоляции, или через некоторое время, когда перегорит элемент, вызвавший замыкание. При замыканиях между фазами переходное сопротивление определяется главным образом сопротивлением электрической дуги.

Когда токи достаточно велики (сотни ампер и более), сопротивление дуги приблизительно постоянно и по своему характеру почти чисто активное. С уменьшением, тока и увеличением длины дуги, что имеет место в течение переходного процесса, ее сопротивление возрастает. Наглядной иллюстрацией такого изменения могут служить графики (рис. 1.1), полученные экспериментально при возникновении самопогасающих дуг на линиях 110 кВ с деревянными опорами.

В ряде случаев переходные сопротивления могут быть столь малы, что практически ими можно пренебречь. Такие замыкания называют *металлическими*.

Естественно, при прочих равных условиях ток при металлическом замыкании больше, чем при наличии переходного сопротивления. Поэтому, когда требуется найти возможные наибольшие величины токов, исходят из наиболее тяжелых условий, считая, что в месте замыкания отсутствуют какие-либо переходные сопротивления<sup>1</sup>.

В трехфазных системах с заземленной нейтралью различают следующие основные виды коротких замыканий в одной точке:

1. трехфазное;
2. двухфазное;
3. однофазное;
4. двухфазное на землю, т. е, замыкание между двумя фазами с одновременным замыканием той же точки на землю.

Трехфазное короткое замыкание является симметричным, так как при нем все фазы остаются в одинаковых условиях<sup>2</sup>. Напротив, все остальные виды коротких замыканий являются несимметричными, поскольку при каждом из них фазы находятся уже в неодинаковых условиях; поэтому системы токов и напряжений при этих видах короткого замыкания в той или иной мере искажены.

Многолетняя аварийная статистика по союзным и зарубежным системам показывает, что при глухозаземленной нейтрали относительная вероятность различных основных видов короткого замыкания характеризуется примерными данными табл. 1.1. В той же таблице показаны рекомендуемые сокращенные обозначения каждого вида короткого замыкания.

Как видно из этой таблицы, подавляющее число коротких замыканий связано с замыканием на землю, в то время как трехфазное короткое замыкание является очень редким. Однако отсюда было бы неправильным делать вывод, что трехфазное короткое замыкание можно вообще оставить без внимания. Поскольку оно все же возможно, с ним следует

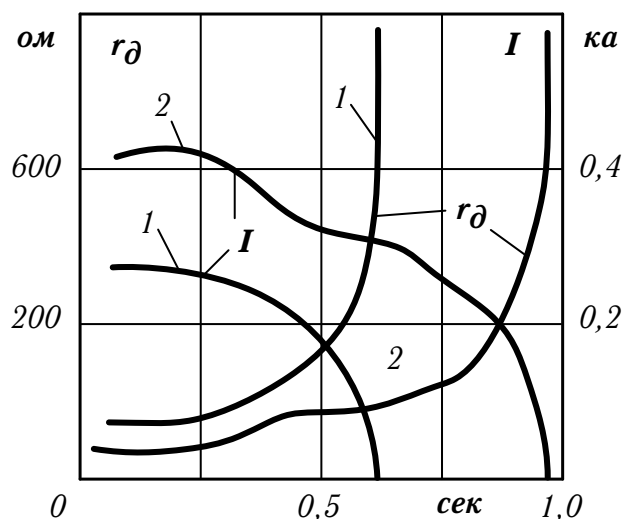


Рис. 1.1: Кривые изменения во времени тока и сопротивления самопогасающей открытой дуги на линии 110 кВ с деревянными опорами. 1, 2 — номера опытов.

<sup>1</sup>Учет переходных сопротивлений и контактных соединений при выполнении расчетов коротких замыканий для установок напряжением до 1000 В имеет особое значение (§ 17.5).

<sup>2</sup>При наличии переходных сопротивлений симметрия сохраняется лишь при равенстве этих сопротивлений.



считаться, тем более что оно иногда может быть решающим для окончательного суждения относительно возможности работы в условиях короткого замыкания. Само изучение процесса трехфазного короткого замыкания особенно важно в связи с тем, что применение метода симметричных составляющих позволяет величины токов и напряжений прямой последовательности любого несимметричного замыкания определять как соответственные величины при некоторых условных трехфазных замыканиях.

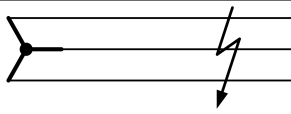
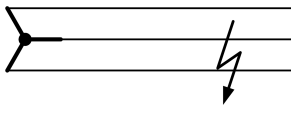
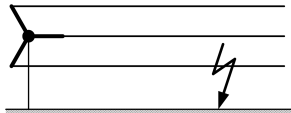
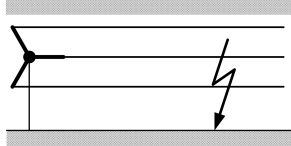
Виды короткого замыкания	Принципиальная схема	Буквенное обозначение на схемах места и вида короткого замыкания	Относительная вероятность короткого замыкания, %
Трехфазное		$K^{(3)}$	5
Двухфазное		$K^{(2)}$	10
Однофазное		$K^{(1)}$	65
Двухфазное на землю		$K^{(1,1)}$	20

Таблица 1.1: Относительная вероятность и сокращенные обозначения основных видов короткого замыкания

Здесь нелишне также отметить, что процесс включения любого трехфазного приемника или невозбужденного синхронного генератора или двигателя можно рассматривать как трехфазное короткое замыкание за некоторым сопротивлением.

Иногда в процессе развития аварии первоначальный вид короткого замыкания переходит в другой вид короткого замыкания. Так, например, в кабельных сетях (с трехжильными кабелями) несимметричные короткие замыкания часто переходят в трехфазные короткие замыкания, так как образовавшаяся при повреждении в кабеле электрическая дуга быстро разрушает изоляцию между его жилами.

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

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

Возможны случаи, когда одновременно возникает несколько несимметрий одинакового или различного вида. Так, например, при обрыве провода воздушной линии один его конец, расположенный близко к точке подвеса, остается изолированным, а другой, упав на землю, образует однофазное короткое замыкание. Здесь одновременно возникают продольная и поперечная несимметрии. В качестве другого примера, когда возникают несимметрии одного вида, может служить так называемое двойное замыкание на землю, т. е. одновременное замыкание на землю разных фаз в различных точках сети, работающей с изолированной нейтралью.

Все виды повреждений, сопровождающихся многократной несимметрией, называют

сложными. К ним, очевидно, относится также любое несимметричное короткое замыкание в сети, работающей в неполнофазном режиме.

Практикой эксплуатации электрических систем установлено, что большая часть возникающих повреждений, особенно на воздушных линиях, имеет проходящий характер, т. е. повреждения самоустраняются после отключения поврежденного участка и не возникают вновь при обратном включении его. Примером такого самоустраняющегося повреждения может служить обычное перекрытие по поверхности гирлянды изоляторов линии, вызванное грозным разрядом. После отключения линии электрическая прочность воздушного промежутка восстанавливается в течение небольшого отрезка времени, необходимого для деионизации воздуха в месте перекрытия.

В соответствии с этим широкое применение нашло автоматическое повторное включение (АПВ) цепей и особенно воздушных линий. Поскольку на последних преобладают замыкания одной фазы, у них производят иногда отключение только поврежденной фазы с после дующим однофазным автоматическим повторным включением (ОАПВ). Наконец, помимо однократного выполняют также многократное автоматическое повторное включение с соответствующими интервалами времени его действия.

Наглядной иллюстрацией эффективности автоматического повторного включения служат данные табл. 1.2, представляющие показатели работы устройств автоматического повторного включения по всем союзным энергосистемам за пятилетие 1962–1966 гг. [2].

Место установки АПВ	Трехфазное АПВ				Однофазное АПВ	
	однократного действия		многократного действия		однократного действия	
	успешно	неуспешно	успешно	неуспешно	успешно	неуспешно
Воздушные линии 1–10 кВ	53,5	46,5	56,2	43,8	—	—
То же 20–35 кВ	69,5	30,5	78,1	21,9	—	—
110–154 кВ	75,0	25,0	80,5	19,5	73,2	26,8
220–330 кВ	76,5	23,5	77,2	22,8	80,7	19,3
400–500 кВ	67,0	33,0	—	—	59,5	40,5
Смешанные линии	56,2	43,8	68,3	31,7	—	—
Кабельные линии всех напряжений	45,3	54,7	43,0	57,0	—	—
Шины	64,8	25,2	—	—	—	—
Трансформаторы	60,0	40,0	—	—	—	—
Средние по всем АПВ данного исполнения	58,2	41,8	69,2	30,8	73,0	27,0

Таблица 1.2: Показатели работы автоматического повторного включения по всем энергосистемам Союза за 1962–1966 гг. (в процентах)

Как видно, на воздушных линиях относительное число самоустраняющихся повреждений, которому соответствует успешная работа автоматического повторного включения, составляет значительное большинство (преимущественно у линий 20–330 кВ) всех повреждений на них, причем успешная работа АПВ многократного действия несколько выше, чем однократного действия. Последнее указывает на то, что для самоустранения повреждения иногда требуется больше времени, чем интервал до первого повторного включения.

В кабельных линиях, как и следовало ожидать, число самоустраняющихся повреждений заметно меньше, чем в воздушных. Оно составляет примерно половину общего числа повреждений в кабелях.

Интересно отметить, что даже у трансформаторов больше половины всех повреждений являются самоустраняющимися.

При неуспешном автоматическом повторном включении, т. е. когда возникшее повреждение в цепи сохранилось, переходный процесс состоит из нескольких этапов. Первый из них наступает в момент возникновения короткого замыкания и продолжается до отключения поврежденного участка. Вторым этапом является пауза (порядка 0,5 сек и более) до момента повторного включения, с которого наступает третий этап, продолжающийся до нового отключения того же участка. При многократном автоматическом повторном включении число этапов соответственно возрастает<sup>3</sup>. При применении однофазного автоматического повторного включения в течение паузы перед повторным включением в системе сохраняется местная продольная несимметрия (отключена одна фаза).

Когда повреждение происходит в узле, связывающем несколько цепей, или на участке с двусторонним питанием, переходный процесс дополнительно усложняется тем, что отключение этих цепей или соответственно участка с его обоих концов обычно происходит неодновременно (каскадное отключение).

Каждый из указанных этапов наступает, когда переходный процесс предшествующего этапа еще не закончен. Иными словами, процесс короткого замыкания при неуспешном автоматическом повторном включении состоит из неоднократно сменяющихся переходных процессов.

Форсировка возбуждения синхронных машин, которую обеспечивают специальные устройства автоматического регулирования возбуждения (АРВ), происходит при снижении напряжения; обычно оно вызвано каким-либо нарушением нормального режима машины. Следовательно, здесь также на возникший переходный процесс накладывается дополнительный переходный процесс нарастания возбуждения машины.

При повреждении обмоток синхронной машины помимо отключения последней от сети производят быстрое ее развозбуждение путем гашения магнитного поля. Процесс такого гашения имеет свои особенности и, чтобы обеспечить сохранность машины, на него накладывают определенные ограничения.

Для иллюстрации процесса короткого замыкания на рис. 1.2 приведены типичные осциллограммы тока короткого замыкания при отсутствии автоматического регулирования возбуждения (рис. 1.2,а) и при наличии его (рис. 1.2,б). В начальной стадии обе осциллограммы практически одинаковы. Это объясняется тем, что здесь их характер определяется главным образом затуханием возникших свободных токов, а нарастание тока возбуждения от действия АРВ благодаря магнитной инерции еще очень мало. В дальнейшем, как видно, при отсутствии АРВ кривая постепенно переходит в синусоиду нового установившегося режима. При наличии АРВ амплитуда кривой тока, достигнув некоторого наименьшего значения, вновь возрастает, стремясь к установившемуся значению, которое, естественно, больше, чем при отсутствии АРВ. Возрастающий характер кривой тока при наличии АРВ обычно получается при заметной удаленности короткого замыкания относительно генератора.

Для дополнительной иллюстрации характерных переходных процессов приведем еще несколько осциллограмм. На рис. 1-3 показаны осциллограммы токов в фазе статора, обмотке возбуждения и продольной демпферной обмотке синхронного генератора мощностью 50 Мвт при внезапном трехфазном коротком замыкании на его выводах. До короткого замыкания генератор работал на холостом ходу и его АРВ было отключено. На рис. 1-4 приведены осциллограммы тока фазы статора асинхронного двигателя 600 кВт и потребляемой им активной мощности при трехфазном коротком замыкании вблизи двигателя и при его дальнейшем самозапуске после отключения короткого замыкания (спустя примерно 1,2 сек).

<sup>3</sup>Пауза перед вторым повторным включением значительно больше, чем перед первым таким включением. Она определяется характеристиками самого выключателя.

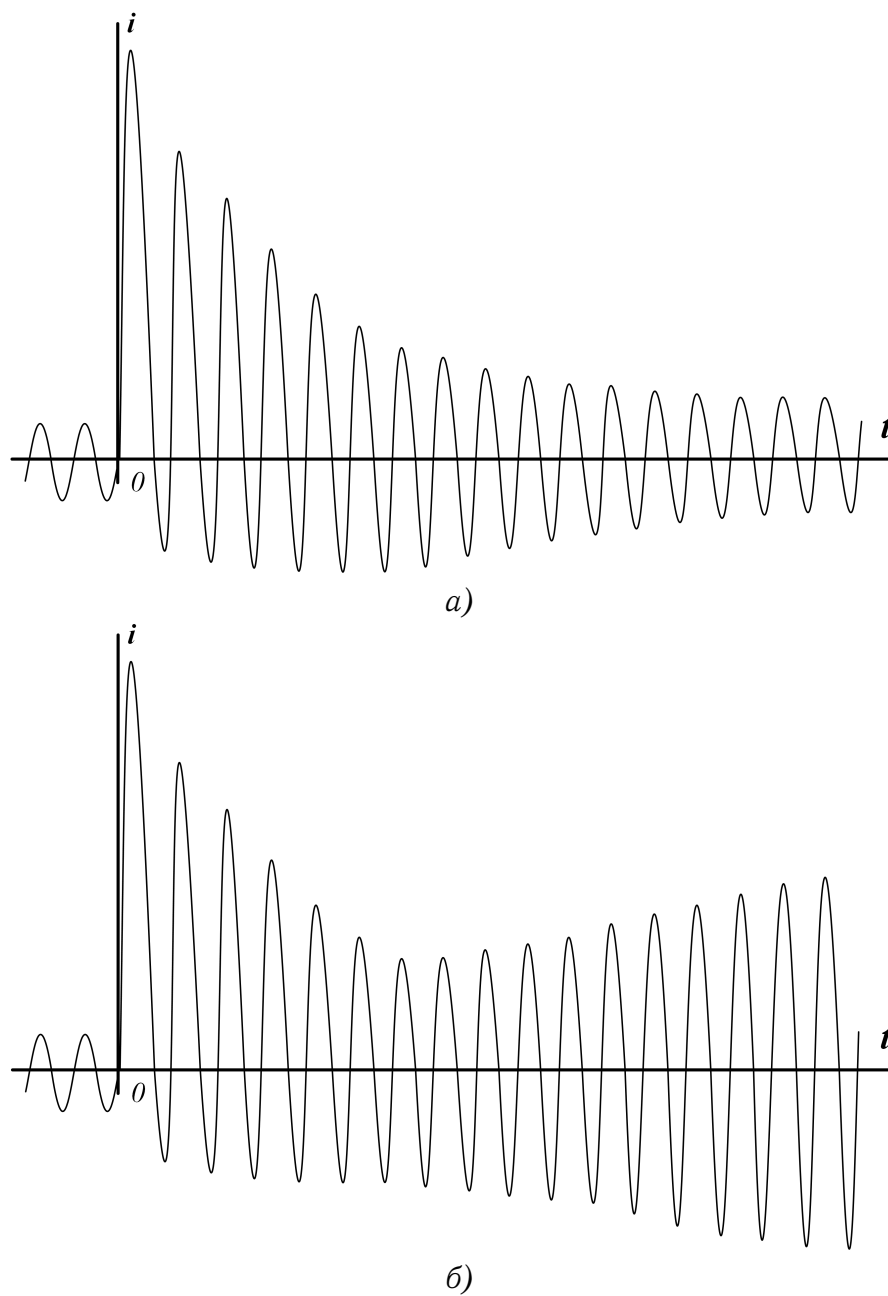


Рис. 1.2: Осциллограммы токов при внезапном коротком замыкании. *а* — при отсутствии автоматического регулирования возбуждения; *б* — при наличии такого регулирования.

## 1.2 Причины возникновения и следствия

Основной причиной возникновения рассматриваемых в дальнейшем электромагнитных переходных процессов являются преимущественно короткие замыкания. Последние в свою очередь являются результатом нарушений изоляции электрического оборудования, которые вызываются старением изоляционных материалов, перенапряжениями, недостаточно тщательным уходом за оборудованием и непосредственными механическими повреждениями (например, повреждение кабеля при выполнении земляных работ без должной осторожности и т. п.). В практике наблюдались случаи, когда короткие замыкания возникали от перекрытия токоведущих частей животными и птицами.

При осуществлении упрощенных схем электрических соединений понижающих подстанций, как известно, используют специальные аппараты — короткозамыкатели (одно- и двухфазные); последние создают преднамеренные короткие замыкания с целью быстрых отключении ранее возникших повреждений.

Таким образом, наряду с короткими замыканиями случайного характера в системе имеют место также преднамеренные короткие замыкания, вызываемые действием установленных короткозамыкателей.

Социалистическое хозяйство предъявляет особые требования к безаварийному электроснабжению всех потребителей электроэнергии. Поэтому внимание и усилия работников в области электроэнергетики должны быть направлены на соблюдение этих требований. Для этого должно быть в первую очередь обеспечено строгое соблюдение Правил технической эксплуатации электрических установок. Помимо того, требуется непрерывное повышение качества продукции, выпускаемой электротехнической промышленностью.

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

Так, например, при коротком замыкании в удаленной точке сети величина тока короткого замыкания составляет лишь незначительную долю номинального тока питающих генераторов и возникновение такого короткого замыкания воспринимается ими как небольшое увеличение нагрузки. Сильное снижение напряжения получается вблизи места трехфазного короткого замыкания, в то время как в других точках системы наблюдается едва заметное снижение напряжения, причем от действия автоматического регулирования возбуждения оно быстро восстанавливается до нормального. Следовательно, при рассматриваемых условиях опасные последствия короткого замыкания проявляются лишь в ближайших к месту короткого замыкания частях системы.

Аналогичная картина, но выраженная не в столь резкой форме, наблюдается при пуске крупных двигателей, синхронных компенсаторов, при включении генераторов способом самосинхронизации, а также при их несинхронном включении.

Обрыв фазы слабо загруженной цепи, очевидно, не вызовет каких-либо существенных изменений режима в системе. Напротив, такой обрыв в цепи с большим нагрузочным током может привести к весьма существенным изменениям токов и напряжений в системе.

Ток короткого замыкания даже в тех случаях, когда он мал по сравнению с номинальным током генератора, обычно во много раз превышает номинальный ток самой ветви, поэтому и при кратковременном прохождении тока короткого замыкания он может вызвать дополнительный нагрев токоведущих элементов и проводников выше допустимого.

Кроме теплового действия, токи короткого замыкания вызывают между проводниками большие механические усилия, которые особенно велики в начальной стадии процесса короткого замыкания, когда ток достигает максимума. При недостаточной прочности проводников и их креплений они могут быть разрушены при коротком замыкании. Равным образом это относится к электрическим машинам и аппаратам, надежность которых мо-

жет быть обеспечена при учете всех проявлений коротких замыканий.

Глубокое снижение напряжения и резкое искажение его симметрии, которое возникает при коротких замыканиях и образовании продольной несимметрии, вредно отражается на работе потребителей. Так, уже при понижении напряжения на 30–40% в течение 1 сек и более достаточно загруженные двигатели промышленного предприятия могут остановиться, что вызовет народнохозяйственный ущерб. Оставаясь включенными в сеть, остановившиеся двигатели могут вызвать дальнейшее снижение напряжения в сети, т. е. полное нарушение нормального электроснабжения не только данного предприятия, но и за его пределами. Следует подчеркнуть, что ряд промышленных производств вообще не допускает никаких (даже кратковременных) перерывов в подаче энергии.

При замыканиях на землю возникают неуравновешенные системы токов. Они способны создавать магнитные потоки, которые достаточны, чтобы в соседних линиях связи и сигнализации навести э. д. с, величины которых могут быть опасны для обслуживающего персонала и аппаратуры этих линий. Заметные мешающие влияния на линии связи возникают также при продольной несимметрии в системе.

Наконец, при задержке отключения короткого замыкания сверх допустимой продолжительности может произойти нарушение устойчивости электрической системы, что является в сущности одним из наиболее опасных последствий короткого замыкания, так как отражается на работе всей системы.

### 1.3 Назначения расчетов и требования к ним

При проектировании и эксплуатации электрических установок и систем для решения многих технических вопросов и задач требуется предварительно произвести ряд расчетов, среди которых заметное место занимают расчеты электромагнитных переходных процессов и, в частности, процессов при внезапном коротком замыкании.

Под расчетом электромагнитного переходного процесса обычно понимают вычисление токов и напряжений в рассматриваемой схеме при заданных условиях. В зависимости от назначения такого расчета находят указанные величины для заданного момента времени или находят их изменения в течение всего переходного процесса. При этом решение обычно проводится для одной или нескольких ветвей и точек схемы.

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

1. сопоставление, оценка и выбор схемы электрических соединений как отдельных установок (станций, подстанций), так и системы в целом;
2. выявление условий работы потребителей при аварийных режимах;
3. выбор аппаратов и проводников и их проверка по условиям работы при коротких замыканиях;
4. проектирование и настройка устройств релейной защиты и автоматизации;
5. определение условий несинхронного включения синхронных машин и включения их способом самосинхронизации;
6. конструктивные решения элементов распределительных устройств и, в частности, шинопроводов на большие рабочие токи;
7. определение числа заземленных нейтралей и их размещения в системе;

8. выбор числа и мощности компенсирующих дугогасящих устройств;
9. определение влияния линий электропередачи на провода связи и сигнализации;
10. проектирование и проверка защитных заземлений;
11. подбор характеристик разрядников для защиты от перенапряжений (включая защиту конденсаторов установок продольной компенсации);
12. оценка и определение параметров гашения поля синхронных машин;
13. оценка и выбор систем возбуждения синхронных машин;
14. проведение различных испытаний;
15. анализ происшедших аварий.

Особенностью расчетов при решении задач, встречающихся в эксплуатации, является необходимость учета конкретных условий рассматриваемого переходного процесса. Напротив, при проектировании часто довольствуются приближенными данными. Поэтому в первом случае требуется большая точность.

Так, например, благодаря тому, что интервалы между параметрами, характеризующими различные типы аппаратов в отношении их устойчивости при коротких замыканиях, достаточно большие, точность расчета для выбора таких аппаратов может быть невелика. Напротив, точность расчета для целей релейной защиты и автоматизации обычно должна быть значительно выше. Здесь, как впрочем и в ряде других случаев, часто требуется выявлять как наибольшие, так и наименьшие возможные величины токов и напряжений, сдвиг между ними в отдельных фазах или между отдельными их симметричными составляющими, их распределение в схеме и т. п.

Неменьшие требования предъявляются к расчетам для анализа аварий, а также к расчетам, проводимым для различных исследовательских целей.

Краткие сведения о расчетных условиях даны в §??.





## Глава 2

# Общие указания к выполнению расчетов

### 2.1 Основные допущения

Как отмечалось выше, расчет электромагнитного переходного процесса в современной электрической системе с учетом всех имеющих место условий и факторов чрезвычайно сложен и практически невыполним. Поэтому, чтобы упростить задачу и сделать ее решение практически возможным, вводят ряд допущений. Последние зависят прежде всего от характера и постановки самой задачи. Те допущения, которые вполне пригодны при решении одной задачи, могут быть совершенно неприемлемыми при решении другой.

Каждый из практических методов расчета, электромагнитных переходных процессов, в частности процесса при коротком замыкании, основан на некоторых допущениях, касающихся преимущественно возможности использования упрощённых представлений об изменении свободных токов в сложных схемах с несколькими источниками, о разных способах учета автоматического регулирования возбуждения синхронных машин и т. п. С ними читатель познакомится в ходе дальнейшего изложения материала. Здесь же остановимся только на тех основных допущениях, которые обычно принимают при решении большинства практических задач, связанных с определением токов и напряжений при электромагнитных переходных процессах. К числу таких допущений следует отнести:

1. отсутствие насыщения магнитных систем. При этом все схемы оказываются линейными, расчет которых значительно проще; в частности, здесь могут быть использованы любые формы принципа наложения.
2. Пренебрежение токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов. Единственным исключением из этого допущения является случай, когда трехстержневой трансформатор с соединением обмоток  $Y_0/Y_0$  включен на напряжение нулевой последовательности (см. §12.5).
3. Сохранение симметрии трехфазной системы. Она нарушается обычно лишь для какого-либо одного элемента, что происходит в результате его повреждения, или преднамеренно по специальным соображениям (см. гл. 15).
4. Пренебрежение емкостными проводимостями. Это допущение обычно является, уместным и заметно не искажает результаты решения, если в рассматриваемой схеме нет продольной компенсации индуктивности цепи, а также дальних линий передач напряжением выше 220 кВ. При рассмотрении простых замыканий на землю (см. §17.2) это допущение, разумеется, совсем непригодно, так как в данном случае ток замыкается именно через емкостные проводимости.

5. Приближенный учет нагрузок. В зависимости от стадии переходного процесса нагрузку приближенно характеризуют некоторым постоянным сопротивлением, обычно чисто индуктивным (см. §5.4 и §6.5).
6. Отсутствие активных сопротивлений. Это допущение в известной мере условно. Оно приемлемо при определении начальных и конечных значений отдельных величин, характеризующих переходный процесс в основных звеньях высокого напряжения электрической системы; при этом приближенный учет активных сопротивлений находит отражение при оценке постоянных времени затухания свободных составляющих рассматриваемых величин. В тех же случаях, когда подобный расчет проводится для протяженной кабельной или воздушной сети с относительно небольшими сечениями проводников (особенно линии со стальными проводами), а также для установок и сетей напряжением до 1 кВ, данное допущение непригодно (см. гл. 17).
7. Отсутствие качаний синхронных машин. Если задача ограничена рассмотрением лишь начальной стадии переходного процесса (т. е. в пределах 0,1–0,2 сек с момента нарушения режима до отключения повреждения), это допущение обычно не вносит заметной погрешности (особенно в токе в месте повреждения). Однако при возникновении существенных качаний или выпадении машин из синхронизма достаточно надежный результат может быть получен лишь с учетом (хотя бы приближенным) такого процесса (см. гл. 19).

## 2.2 Понятие о расчетных условиях

В соответствии с целевым назначением проводимого на практике расчета электромагнитного переходного процесса устанавливают исходные расчетные условия. Они весьма разнообразны и при решении разных задач могут быть даже противоположными.

Так, например, для выбора выключателя по условиям его работы при коротком замыкании должны быть определены соответствующие возможные наибольшие величины тока короткого замыкания. С этой целью исходят из предположения, что короткое замыкание происходит в то время, когда включено наибольшее число генераторов, что вид короткого замыкания такой, при котором ток достигает наибольшей величины, что короткое замыкание металлическое и что оно произошло непосредственно у выводов самого выключателя. Помимо того, здесь устанавливают расчетное время размыкания контактов выключателя и цикл производимых им операций (включение и отключение).

Для выбора трубчатого разрядника требуется знать не только наибольшую, но и возможную наименьшую величину тока короткого замыкания, для определения которой, разумеется, должны быть приняты совсем иные расчетные условия.

Большое разнообразие расчетных условий встречается при выполнении расчетов для выбора и настройки устройств релейной защиты и автоматики. В них устанавливают исходные предшествующие режимы заданной системы, число и расположение заземленных нейтралей, виды повреждений, и последовательность отключения поврежденного участка и т. п.

При решении вопроса гашения поля синхронной машины в качестве расчетного режима может быть как режим короткого замыкания, так и холостого хода.

Приведенные примеры показывают, сколь велико разнообразие расчетных условий. Обоснование расчетных условий для конкретных технических задач (с учетом вероятности отдельных факторов) является одним из важных вопросов соответствующих специальных дисциплин.

## 2.3 Система относительных единиц

Представление любых физических величин не в обычных для них соответствующих именованных единицах, а в относительных, безразмерных единицах позволяет существенно упростить некоторые теоретические выкладки и придать им более общий характер. Равным образом и в практических расчетах такое представление величин придает результатам большую наглядность и позволяет быстрее ориентироваться в порядке определяемых значений. Благодаря этому система относительных единиц широко используется, хотя на первый взгляд она может казаться несколько искусственной и даже излишней.

С выражением величин в относительных единицах (в долях или процентах) читатель уже встречался при изучении электрических машин, где реактивности обычно выражают в долях единицы, напряжения короткого замыкания трансформаторов — в процентах, пусковые токи и моменты асинхронных двигателей — в кратностях от их номинальных значений и т. д. Теперь нам нужно познакомиться с системой относительных единиц в более широком аспекте, имея в виду использование ее при решении различных вопросов и задач для схем с произвольным числом всевозможных элементов.

Напомним, что под относительным значением какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения. Следовательно, чтобы выразить отдельные величины в относительных единицах, нужно прежде всего выбрать те величины, которые должны служить соответственными единицами измерения, или, как говорят, установить базисные единицы (или условия).

Пусть за базисный ток и базисное междуфазное напряжение приняты некоторые произвольные величины  $I_6$  и  $U_6$ . Тогда базисная мощность трехфазной системы, очевидно, будет:

$$S_6 = \sqrt{3}U_6I_6 \quad (2.1)$$

и базисное сопротивление

$$z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3}I_6} \quad (2.2)$$

т. е. оно подчинено закону Ома, чтобы обеспечить тождественную запись этого закона как в именованных, так и в относительных единицах.

Как видно, из четырех базисных единиц  $I_6$ ,  $U_6$ ,  $S_6$  и  $z_6$  только две могут быть выбраны произвольно, а две другие уже получаются из указанных соотношений. Фазные и междуфазные базисные напряжения, а также фазные и линейные базисные токи связаны между собой известными соотношениями для симметричной трехфазной системы. Следует особо подчеркнуть, что выбранные базисные единицы служат для измерения как полных величин, так и их составляющих (активных, реактивных и пр.).

Таким образом, при выбранных базисных условиях относительные значения э. д. с., напряжения, тока, мощности и сопротивления будут:

$$E_{(6)} = \frac{E}{U_6} \quad (2.3)$$

$$U_{(6)} = \frac{U}{U_6} \quad (2.4)$$

$$I_{(6)} = \frac{I}{I_6} \quad (2.5)$$

$$S_{(6)} = \frac{S}{S_6} \quad (2.6)$$

$$z_{(б)*} = \frac{z}{z_б} \quad (2.7)$$

где звездочка указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс (б) — что она приведена к базисным условиям. Эти индексы, как и многие другие, часто опускают, если смысл выражения ясен из текста.

Относительные фазные и междуфазные напряжения численно одинаковы; равным образом численно одинаковы относительные фазная мощность и мощность трех фаз.

Используя (2.2), можно формальное определение относительного сопротивления по (2.7) представить в ином виде:

$$z_{(б)*} = \frac{z}{z_б} = \frac{\sqrt{3}I_б z}{U_б} \quad (2.8)$$

или, иначе,

$$z_{(б)*} = z \frac{S_б}{U_б^2} \quad (2.9)$$

где  $z$  — заданное сопротивление, *ом* на фазу;  $I_б$  — базисный ток, *ка* (*а*);  $U_б$  — базисное междуфазное напряжение, *кв* (*в*);  $S_б$  — базисная мощность, *Мва* (*ва*).

Из последних выражений следует, что относительное сопротивление численно равно относительному падению напряжения в данном элементе при протекании через него принятого базисного тока (или мощности).

Поскольку выбор базисных условий произволен, то одна и та же действительная величина может иметь разные численные значения при выражении ее в относительных единицах. Обычно относительные сопротивления элементов задаются при номинальных условиях (т. е. при  $I_n$  или  $S_n$  и  $U_n$ ). Их величины определяются по (2.8) и (2.9), где базисные единицы должны быть заменены соответственными номинальными, т. е.

$$z_{(н)*} = \frac{\sqrt{3}I_n z}{U_n} \quad (2.8a)$$

и

$$z_{(н)*} = z \frac{S_n}{U_n^2} \quad (2.9a)$$

Иногда относительные величины выражают не в долевых единицах, а в процентах. Связь между такими выражениями очевидна; так, например,

$$z_{\%} = 100z \quad (2.10)$$

Активное сопротивление трансформатора весьма мало. Поэтому, пренебрегая им, можно считать, что задаваемое в процентах напряжение короткого замыкания трансформатора  $U_{к\%} = z_{\%} \approx x_{\%}$ . Если при этом принять, что индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора приближенно изменяется пропорционально квадрату числа витков его обмоток (что довольно близко к действительности), то заданное значение  $U_{к\%}$ , следует считать от напряжения холостого хода того ответвления регулируемой обмотки, которое установлено у трансформатора.

Для выполнения расчета в относительных единицах нужно всё э. д. с. и сопротивления элементов схемы выразить в относительных единицах при выбранных базисных условиях. Если они заданы в именованных единицах, то для перевода их относительные единицы служат выражения (2.3), (2.8) или (2.9). Когда же они заданы в относительных единицах

при номинальных условиях, то их пересчет к базисным условиям нужно производить по следующим очевидным соотношениям:

$$E_{(\text{б})}^* = E_{(\text{н})}^* \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{б}}} \quad (2.11)$$

$$z_{(\text{б})}^* = z_{(\text{н})}^* \frac{I_{\text{б}} U_{\text{н}}}{I_{\text{н}} U_{\text{б}}} \quad (2.12)$$

или

$$z_{(\text{б})}^* = z_{(\text{н})}^* \frac{S_{\text{б}} U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}} U_{\text{б}}^2} \quad (2.13)$$

При выборе базисных условий следует руководствоваться соображениями, чтобы вычислительная работа была по возможности проще и порядок числовых значений относительных базисных величин был достаточно удобен для оперирования с ними. Для базисной мощности  $S_{\text{б}}$ , целесообразно принимать простое круглое число (1000 Мва, 100 Мва и т. п.), а иногда часто повторяющуюся в заданной схеме номинальную мощность (или кратную ей). За  $U_{\text{б}}$  рекомендуется принимать  $S_{\text{н}}$  или близкое к нему. При  $U_{\text{б}} = U_{\text{н}}$  пересчет относительных э. д. с. вообще отпадает ( $E_{(\text{б})}^* = E_{(\text{н})}^*$ ), а выражения для пересчета относительных сопротивлений принимают более простой вид:

$$z_{(\text{б})}^* = z_{(\text{н})}^* \frac{I_{\text{б}}}{I_{\text{н}}} \quad (2.12a)$$

$$z_{(\text{б})}^* = z_{(\text{н})}^* \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} \quad (2.13a)$$

Равенство  $U_{\text{б}} = U_{\text{н}}$  вообще говоря, соблюдается только для части элементов, так как напряжения  $U_{\text{н}}$  элементов одной и той же электрической цепи в общем случае могут быть неодинаковы. Однако это различие сравнительно мало (в пределах  $\pm 10\%$ ) и в приближенных расчетах им часто пренебрегают, полагая  $U_{\text{н}}$  всех элементов одной ступени напряжения одинаковыми и равными некоторому среднему номинальному напряжению  $U_{\text{ср}}$  для этой цепи. (см. §??). Исключение целесообразно делать для реакторов, поскольку они составляют обычно значительную часть общего сопротивления цепи, определение которого всегда желательно производить с большей точностью. В тех случаях, когда реакторы использованы на напряжениях ниже их номинальных напряжений (например, реактор 10 кВ в установке 6 кВ и т. п.), пересчет их относительных сопротивлений по напряжениям, конечно, обязателен.

**Пример ??-1.** Асинхронный двигатель АД через кабель Кб и реактор Р присоединен к шинам (рис. 2.1), напряжение на которых поддерживается практически неизменным и равным 6,3 кВ. Определить величины тока и момента при пуске этого двигателя, выразив их в долях от его соответствующих номинальных величин.

Данные: асинхронный двигатель АД 2500 кВт, 6 кВ,  $\cos \varphi = 0,9$ ,  $\eta = 96\%$ ,  $I_{\text{пуск}} = 5,6$ ,  $M_{\text{пуск}} = 0,9$ . Реактор Р — 10 кВ, 400 а,  $x\% = 3\%$ . Кабель Кб — 1,25 км,  $x = 0,071$  ом/км.

Примем за базисные величины номинальные данные двигателя, т. е.

$$U_{\text{б}} = 6 \text{ кВ}, \quad S_{\text{б}} = \frac{2500}{0,9 \cdot 0,96} = 2900 \text{ кВа}$$

и соответственно

$$I_{\text{б}} = \frac{2900}{\sqrt{3} \cdot 6} = 280 \text{ а}$$

Относительная реактивность двигателя при пуске составляет

$$x'' = \frac{1}{5,6} = 0,18$$

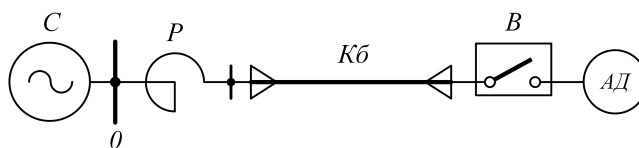


Рис. 2.1: Схема к примеру 2.1.1.

Относительные базисные реактивности реактора и кабеля будут:

$$x_p = \frac{3}{100} \cdot \frac{280}{400} \cdot \frac{10}{6} = 0,035$$

и

$$x_{Kб} = 0,071 \cdot 1,25 \cdot \frac{2,9}{6^2} = 0,007.$$

Относительное базисное напряжение на шинах источника составляет:

$$U_* = \frac{6,3}{6} = 1,05.$$

Искомая величина пускового тока будет:

$$I_{* \text{ пуск}} = \frac{1,05}{0,035 + 0,007 + 0,18} = 4,74.$$

Для определения пускового момента предварительно находим напряжение у двигателя при пуске:

$$U_* = 4,74 \cdot 0,18 = 0,85;$$

следовательно, искомый пусковой момент составляет:

$$M_{* \text{ пуск}} = U_*^2 M_{* \text{ пуск.н}} = 0,85^2 \cdot 0,9 = 0,648.$$

Выше рассмотрены величины, с которыми преимущественно приходится оперировать при выполнении обычных электрических расчетов. Однако, как отмечалось ранее, в системе относительных единиц можно выразить любые физические величины, в том числе и неэлектрические. Остановимся на определении относительных значений тех величин, с которыми придется иметь дело в дальнейшем.

За единицу измерения угловых скоростей обычно принимают синхронную угловую скорость  $\omega_c$  т. е.  $\omega_6 = \omega_c$ . Тогда произвольная угловая скорость в относительных базисных единицах будет:

$$\omega_{(6)} = \frac{\omega}{\omega_6} = \frac{\omega}{\omega_c}. \quad (2.14)$$

Соответственно этому в качестве базисных единиц принимают: для индуктивности

$$L_6 = \frac{z_6}{\omega_6} = \frac{z_6}{\omega_c};$$

для потокосцепления

$$\Psi_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{\omega_{\delta}} = \frac{U_{\delta}}{\omega_c};$$

т. е. потокосцепление, индуцирующее при базисной угловой скорости базисное напряжение.

Таким образом, при указанных базисных единицах и сохранении угловой скорости неизменной и равной синхронной, очевидно, имеем:

$$x_{(\delta)} = \omega_c L_{(\delta)} = L_{(\delta)}; \quad (2.15)$$

Вместо индуктивности  $L$  здесь может быть также взаимная индуктивность  $M$ .

$$\Psi_{(\delta)} = I_{(\delta)} L_{(\delta)} = I_{(\delta)} x_{(\delta)}; \quad (2.16)$$

$$E_{(\delta)} = \omega_c \Psi_{(\delta)} = \Psi_{(\delta)}; \quad (2.17)$$

т. е. при этих условиях индуктивное сопротивление численно равно индуктивности, а потокосцепление численно равно э. д. с. или соответствующему падению напряжения.

Подобная возможность замены одних относительных величин численно равными им другими представляет одно из существенных достоинств системы относительных единиц.

Время также можно выражать в относительных единицах. За единицу его измерения обычно принимают время, в течение которого ротор машины при синхронной скорости вращения повернется на один электрический радиан, т. е. базисное время  $t_{(\delta)} = 1/\omega_c$ , что при частоте 50 гц составляет  $t_{(\delta)} = 1/314$  сек. Следовательно, время, выраженное в относительных единицах, будет:

$$t_{(\delta)} = \frac{t}{t_{(\delta)}} = \omega_c t; \quad (2.18)$$

при  $f = 50$  гц

$$t_{(\delta)} = 314t. \quad (2.18a)$$

Для постоянной времени контура с  $L$  и  $r$  имеем:

$$T = \frac{L}{r} = \frac{x}{\omega_c r} = \frac{x_{(\delta)}}{\omega_c r_{(\delta)}}, \text{ сек},$$

чтобы перевести в относительные единицы, достаточно по (2.18) ее умножить на  $\omega_c$ :

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

Таким образом, относительная величина постоянной времени равна отношению индуктивного и активного сопротивлений, выраженных в именованных или относительных единицах.

Применение системы относительных единиц к цепям с магнитными связями, а также для роторных цепей электрических машин, где имеют место некоторые особенности, рассмотрено далее.

## 2.4 Составление схемы замещения

При наличии трансформаторов (или автотрансформаторов) в схеме для упрощения проводимых расчетов такую схему целесообразно предварительно представить схемой замещения, т. е. имеющиеся в ней магнитносвязанные цепи заменить одной эквивалентной электрически связанной цепью. Составление такой схемы замещения сводится к приведению параметров элементов и э. д. с. различных ступеней трансформации заданной схемы к какой-либо одной ступени, выбранной за основную. Само приведение осуществляется на основе соотношении, которые вытекают из известной теории трансформатора.

Чтобы исключить учет группы соединения обмоток трансформатора, в дальнейшем используем коэффициент трансформации, определяемый в соответствии с ранее принятым допущением (см. §??) как отношение междуфазных напряжений холостого хода его обмоток при установленных на них ответвлениях.

Пусть цепь некоторой ступени напряжения схемы связана с выбранной в этой схеме основной ступенью рядом каскадно включенных трансформаторов с коэффициентами трансформации  $k_1, k_2, \dots k_n$ . Используя известные соотношения для э. д. с. (напряжений), токов и сопротивлений при приведении их с одной стороны трансформатора на другую, можно записать общие выражения для определения приведенных к основной ступени значений отдельных величин этой цепи:

$$\overset{\circ}{E} = (k_1, k_2, \dots k_n)E; \quad (2.19)$$

$$\overset{\circ}{U} = (k_1, k_2, \dots k_n)U; \quad (2.19a)$$

$$\overset{\circ}{I} = \frac{1}{(k_1, k_2, \dots k_n)}I; \quad (2.20)$$

$$\overset{\circ}{z} = (k_1, k_2, \dots k_n)^2 z, \quad (2.21)$$

Кружок над буквой указывает, что данная величина является приведенной; для упрощения записи его часто опускают.

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

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

Если величины заданы в относительных единицах, то их значения в именованных единицах определяют, исходя из соответствующих выражений §??. Так, сопротивление элемента, для которого известно его  $z_{(н)*}$ , на основании (2.8a) или (2.9a) будет:

$$z = z_{(н)*} \frac{U_{н}}{\sqrt{3}I_{н}}, \text{ ом} \quad (2.22)$$

или

$$z = z_{(н)*} \frac{U_{н}^2}{S_{н}}, \text{ ом} \quad (2.23)$$

Рассмотренное приведение по действительным коэффициентам трансформации для сокращения называют точным приведением. В отличие от него в практических расчетах



часто выполняют приближенное приведение, позволяющее значительно быстрее и проще получить приближенную схему замещения. Сущность такого приведения заключается в следующем.

Для каждой ступени трансформации устанавливают среднее номинальное напряжение  $U_{\text{ср}}$ , а именно<sup>1</sup>:

**515; 340; 230; 154; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15 кВ**

и при этом условно принимают, что номинальные напряжения всех элементов<sup>2</sup>, находящихся на одной ступени, одинаковы и равны соответствующим значениям по указанной шкале. Тогда коэффициент трансформации каждого трансформатора (или автотрансформатора), очевидно, равен отношению  $U_{\text{ср}}$  тех ступеней, которые он связывает, а результирующий коэффициент трансформации каскада трансформаторов будет определяться как отношение  $U_{\text{ср}}$  крайних ступеней. Следовательно, при приближенном приведении выражения для пересчета принимают более простой вид:

$$\overset{\circ}{E} = \frac{U_{\text{ср.б}}}{U_{\text{ср}}} E; \quad (2.24)$$

$$\overset{\circ}{U} = \frac{U_{\text{ср.б}}}{U_{\text{ср}}} U; \quad (2.24a)$$

$$\overset{\circ}{I} = \frac{U_{\text{ср.б}}}{U_{\text{ср}}} I; \quad (2.25)$$

$$\overset{\circ}{z} = \left( \frac{U_{\text{ср.б}}}{U_{\text{ср}}} \right)^2 z, \quad (2.26)$$

где  $U_{\text{ср}}$  — среднее номинальное напряжение ступени, с которой производится пересчет;  $U_{\text{ср.б}}$  — тоже выбранной основной степени.

Если элемент задан своим относительным сопротивлением  $z_{(н)}^*$ , то его сопротивление в именованных единицах, приближенно приведенное к принятой основной ступени, легко определить по (2.23), вводя в последнее вместо  $U_{\text{н}}$  среднее номинальное напряжение основной ступени.

Приближенное приведение схемы вносит некоторую погрешность в расчет; поэтому его надо применять с известной осторожностью. Для получения более надежных результатов приведение схемы следует производить по действительным коэффициентам трансформации, особенно в тех случаях, когда имеются трансформаторы (или автотрансформаторы) с широким диапазоном регулирования напряжения под нагрузкой (с РПН)<sup>3</sup> или специальные регулирующие устройства, как-то: линейные регулировочные автотрансформаторы (ЛРА), вольтодобавочные регулировочные трансформаторы (ВРТ).

Чтобы иметь представление о порядке погрешности приближенного приведения, проведем исследование применительно к элементарной схеме, показанной в верхней части рис.2.2, где для упрощения выкладок введены чисто индуктивные сопротивления  $x_I$  и  $x_{II}$ . Ограничим свою задачу рассмотрением погрешностей только в токах при трехфазном коротком замыкании в точке К.

Если  $U_{\text{нI}}$  и  $U_{\text{нII}}$  — номинальные напряжения обмоток трансформатора, то при изменении числа витков обмотки I напряжение холостого хода будет  $U_I = \alpha U_{\text{нI}}$  и коэффициент трансформации  $k' = \alpha k$ , где  $\alpha$  — относительное отклонение указанного напряжения или коэффициента трансформации от их номинальных значений.

В соответствии с принятым допущением (см. §??) при изменении числа витков регулируемой обмотки индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора в делом, приведенное к стороне

<sup>1</sup> Для ступеней ниже 1 кВ шкала средних номинальных напряжений приведена в § 17-5.

<sup>2</sup> Кроме реакторов, о чем указывалось в §??.

<sup>3</sup> Так, например, по ГОСТ 12965-67 трехфазные двух- и трех- обмоточные трансформаторы с РПН мощностью 6,3 МВА и выше должны иметь в нейтрали обмотки высшего напряжения регулирование  $\pm 16\%$ .

его нерегулируемой обмотки, остается постоянным. Поэтому в данном случае можно сказать, что оно включено в  $x_{II}$ .

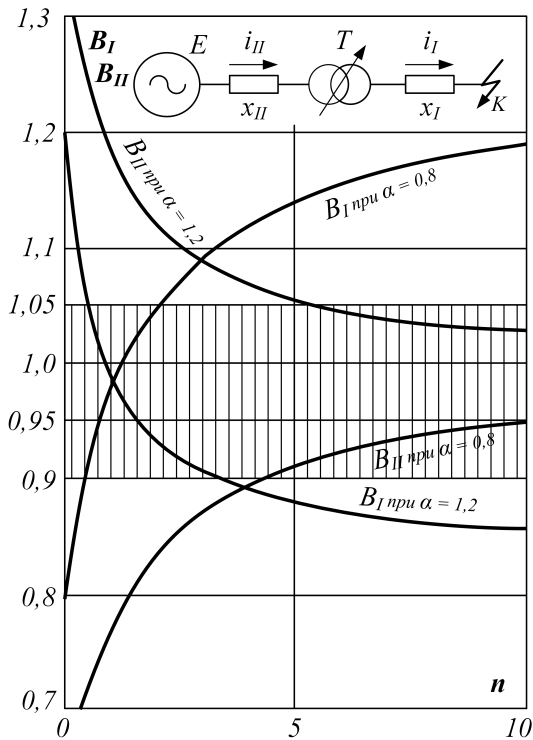


Рис. 2.2: Кривые изменения отношений  $B_I$  и  $B_{II}$  в функциях  $n$ .

$B_I$  и  $B_{II}$  в пределах  $\pm 5\%$ ; такая погрешность является вполне допустимой в большинстве практических расчетов токов короткого замыкания. Как видно, при указанном диапазоне отклонения  $\alpha$  погрешность приближенного решения может выходить достаточно далеко за пределы допустимой зоны. При заданном значении  $\alpha$  величины отношений  $B_I$  и  $B_{II}$  при изменении  $n$  от 0 до  $\infty$  находятся в пределах:

$$B_I = \alpha \div \frac{1}{\alpha} \quad \text{и} \quad B_{II} = \alpha^2 \div 1,$$

причем если при  $\alpha \geq 1$  всегда  $B_{II} \geq 1$ , то  $B_I$  в зависимости от  $n$  может быть как больше, так и меньше единицы. При малых значениях тока  $n$  погрешность приближенного определения тока  $I_{II}$  больше, чем тока  $I_I$ , а при больших  $n$  имеет место обратное соотношение.

Если в схеме рис. 2.2 регулирование осуществляется на обмотке  $II$  (в данном случае на стороне источника), то коэффициент трансформации  $k' = U_{нI}/\beta U_{нII} = k/\beta$ . Приняв  $\beta = 1/\alpha$ , можно величины  $B_I$  и  $B_{II}$  определять по (2.29) и (2.30), где только при подсчете  $n$  реактивность трансформатора должна быть включена в  $x_I$ , т. е. в реактивность ступени  $I$ .

При каскаде трансформаторов ошибка приближенного приведения может как нарастать, так и, напротив, снижаться. Это зависит от установки регулируемых обмоток трансформаторов. Заранее предвидеть порядок этих погрешностей в общем случае невозможно.

Используемые приближенные (без учета намагничивающего тока) схемы замещения трансформаторов и автотрансформаторов с двумя и большим числом обмоток, а также с обмотками, расщепленными на параллельные ветви, приведены в приложении П-7, где также даны их некоторые типовые параметры. Линейные регулировочные автотрансформаторы следует рассматривать как обычные автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации.

При трехфазном коротком замыкании за  $x_I$  для токов имеем:

$$I_I = \frac{\alpha k E}{x_I + \alpha^2 k^2 x_{II}} \quad (2.27)$$

и

$$I_{II} = \alpha k I_I. \quad (2.28)$$

Найдем отношения значений этих токов при произвольном  $\alpha$  к их значениям при  $\alpha = 1$ . После небольших преобразований эти отношения можно представить в следующем виде:

$$B_I = \frac{I_I}{I_I(\alpha=1)} = \frac{\alpha(1+n)}{1+\alpha^2 n}; \quad (2.29)$$

$$B_{II} = \frac{I_{II}}{I_{II}(\alpha=1)} = \alpha B_I, \quad (2.30)$$

где  $n = \frac{k^2 x_{II}}{x_I} = \frac{\dot{x}_{II}}{x_I} = \frac{x_{II}}{x_I}$  — отношение соответствующих реактивностей, приведенных к какой-либо одной ступени трансформации, при  $\alpha = 1$ .

По этим выражениям при  $\alpha = 0,8$  и  $\alpha = 1,2$  построены кривые изменения  $B_I$  и  $B_{II}$  в функции  $n$  (рис. 2.2). Штриховкой отмечена зона отклонений

До сих пор предполагалось, что сопротивления элементов схемы замещения и э. д. с. определяются в именованных единицах. Разумеется, они могут быть выражены и в относительных единицах. Для этого, выбрав на основной ступени напряжения базисные условия, следует выполнить соответствующий пересчет.

Так, если сопротивление  $z$  связано с основной ступенью, для которой выбраны базисные величины  $U_6$  и  $I_6$  (или  $S_6$ ), трансформаторами с коэффициентами трансформации  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , то в соответствии с (2.21) и (2.8) или (2.9) его относительная величина в схеме замещения будет:

$$z_{(6)*} = z(k_1 k_2, \dots, k_n)^2 \frac{\sqrt{3} I_6}{U_6}, \quad (2.86)$$

или

$$z_{(6)*} = z(k_1 k_2, \dots, k_n)^2 \frac{S_6}{U_6^2}. \quad (2.96)$$

Этим выражениям можно придать тот же вид, что и (2.8) и (2.9), введя коэффициенты трансформации в соответствующие базисные величины, т. е.

$$z_{(6)*} = z \frac{\sqrt{3} I_6^\circ}{U_6^\circ}, \quad (2.8в)$$

или

$$z_{(6)*} = z \frac{S_6^\circ}{U_6^2}, \quad (2.8в)$$

где

$$U_6^2 = \frac{1}{k_1 k_2, \dots, k_n} U_6, \quad (2.31)$$

$$I_6^\circ = (k_1 k_2, \dots, k_n) I_6 \quad (2.32)$$

или, иначе,

$$I_6^\circ = \frac{S_6}{\sqrt{3} U_6^\circ}. \quad (2.32а)$$

— соответственно базисные напряжение и ток на той ступени, где находится данное сопротивление  $z$ .

Следовательно, для составления эквивалентной схемы замещения в относительных единицах нужно прежде всего на одной из ступеней напряжения заданной схемы выбрать базисные единицы и затем по (2.31) — (2.32а) определить базисные единицы для каждой другой ступени напряжения. После этого по (2.3) — (2.5), (2.8), (2.9) и (2.11) — (2.13) следует подсчитать все величины в относительных единицах при базисных условиях, имея ввиду, что в каждом из указанных выражений под  $U_6$ ,  $I_6$  и  $z_6$  всегда надо понимать базисные напряжение, ток и сопротивление той ступени трансформации, на которой находятся подлежащие приведению величины.

При такой последовательности приведения магнитносвязанной схемы коэффициенты трансформации промежуточных трансформаторов (их определение — см. выше) учтены в базисных единицах каждой ступени напряжения заданной схемы.

Когда приведение схемы производится приближенно, пересчет к базисным условиям значительно упрощается, если за  $U_6$  принимать значение  $U_{ср}$  соответствующей ступени. В этом случае можно использовать (2.8) и (2.9), а также (2.12а) и (2.13а), помня, что в (2.12а)  $I_6$  и  $I_n$  должны быть отнесены к одной ступени напряжения<sup>4</sup>.

Что касается э. д. с. и напряжений, то при этих условиях их относительные номинальные и базисные значения совпадают.

Следует особо подчеркнуть, что точность расчета, конечно, не зависит от того, в какой системе единиц выражены элементы эквивалентной схемы замещения. Последняя в обоих случаях, как показано выше, может быть составлена либо точно, либо приближений.

Магнитная связь в схеме возможна не только через трансформаторы или автотрансформаторы. Цепи одного или разных напряжений могут быть связаны взаимной индукцией, влияние которой может сказываться весьма существенно. Наглядным примером служит сдвоенный реактор, где используется эффект взаимной индукции между параллельными ветвями его обмотки. Схема замещения такого реактора и основные его характеристики приведены в приложении П-5. Очень сильно взаимная индукция проявляется между воздушными линиями передачи, проходящими по общей трассе, при протекании по ним токов нулевой последовательности. В подобных случаях также целесообразно освободиться от магнитных связей, перейдя к соответствующей схеме замещения. Этот вопрос рассмотрен в §12-7, где приведены все необходимые указания.

Когда элементы схемы замещения выражены в именованных единицах, найденные в ней токи и напряжения являются реальными только для той ее части, ступень напряжения которой принята в качестве основной. Истинные токи и напряжения всех прочих участков схемы находят соответствующим пересчетом, исходя из (2.19а) и (2.20) или (2.24а) и (2.25). Если схема замещения составлена в системе относительных единиц, то для получения значений токов и напряжений в именованных единицах нужно найденные их относительные величины умножить на соответствующие базисные единицы данной ступени трансформации.

*Пример ??-2.* Составить схему замещения для схемы рис. 2.3,а, выразив ее элементы в именованных и относительных единицах; при этом сделать точное и приближенное приведение схемы.

Вычислить начальные значения периодической слагающей тока при трехфазном коротком замыкании поочередно в точках К-1, К-2 и К-3. Оценить влияние регулирования напряжения у трансформатора Т-1 и линейного регулировочного автотрансформатора ЛРА на величины указанных токов.

Данные трансформатора Т-1 40 Мва,  $115 \pm 16\%/38,5/11$  кВ,  $u_{вс} = 17\%$ ,  $u_{вн} = 10,5\%$ ,  $u_{сн} = 6\%$ ;

трансформатор Т-2 6,3 Мва, 35/6,6 кВ,  $u_K = 7,5\%$ ;

линейный регулировочный трансформатор ЛРА 4 Мва, 10 кВ  $\pm 10\%$ ,  $u_K = 0,5\%$ ;

линия Л-1 60 км,  $x=0,4$  ом/км;

линия Л-2 10 км,  $x=0,4$  ом/км;

система С — напряжение практически неизменно и составляет  $U_C = 117$  кВ.

*а) Точное приведение в именованных единицах*

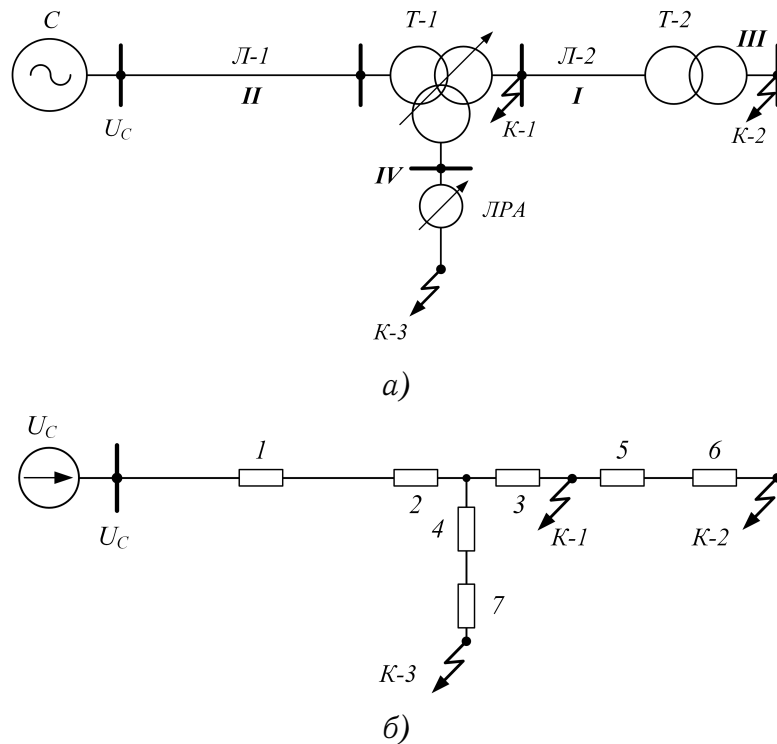
В качестве основной выберем ступень, где включен источник.

Схема замещения представлена на рис. 2.3,б. Реактивности ее элементов<sup>5</sup> будут:

$$x_1 = 0,4 \cdot 60 = 24 \text{ ом}; \quad x_5 = 0,4 \cdot 10 \cdot \left( \frac{115}{38,5} \right)^2 = 36 \text{ ом}.$$

<sup>4</sup>Как отмечалось ранее, для реакторов пересчет по напряжениям желателен, а в случае использования их в установках, напряжения которых меньше номинальных напряжений реакторов, — обязателен.

<sup>5</sup>Элементам схемы замещения рекомендуется давать порядковые номера, продолжая их для элементов, которые получаются в результате производимого преобразования схемы.

Рис. 2.3: К примеру ??-2. *а* — исходная схема; *б* — схема замещения.

Для  $T-1$  предварительно находим напряжения короткого замыкания каждой его обмотки (см. П-7), т. е.  $u_B = 0,5(17 + 10,5 - 6) = 10,75\%$ ;  $u_C = 17 - 10,75 = 6,25\%$ ;  $u_H = 6,0 - 6,25 = 0,25\%$ ; следовательно, по (2.23)

$x_2 = \frac{10,75}{100} \cdot \frac{115^2}{40} = 35,5$  ом; аналогично  $x_3 = 20,5$  ом и  $x_4 = -0,83$  ом; для трансформатора  $T-2$

$$x_6 = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{35^2}{6,3} \left( \frac{115}{38,5} \right)^2 = 131 \text{ ом.}$$

и для ЛРА

$$x_7 = \frac{0,5}{100} \cdot \frac{10^2}{4} \left( \frac{115}{11} \right)^2 = 13,6 \text{ ом.}$$

Фазное напряжение источника

$$U_C = \frac{117}{\sqrt{3}} = 67,5 \text{ кВ.}$$

Искомые величины токов составят:

при коротком замыкании в  $K-1$

ток в линии  $Л-1$

$$I = \frac{67,5}{24 + 35,5 + 20,5} = \frac{67,5}{80} = 0,845 \text{ кА;}$$

в месте короткого замыкания

$$I_K = 0,845 \cdot \frac{115}{38,5} = 2,53 \text{ кА;}$$

при коротком замыкании а  $K-2$

ток в линии  $Л-1$

$$I = \frac{67,5}{80 + 36 + 131} = \frac{67,5}{247} = 0,275 \text{ кА;}$$

в линии Л-2

$$I = 0,275 \cdot \frac{115}{38,5} = 0,82 \text{ ка};$$

в месте короткого замыкания

$$I_K = 0,82 \cdot \frac{35}{6,6} = 4,35 \text{ ка};$$

при коротком замыкании в К-3 (без ЛРА)

ток в линии Л-1

$$I = \frac{67,5}{24 + 35,5 + 0,83} = \frac{67,5}{58,8} = 1,17 \text{ ка};$$

в месте короткого замыкания

$$I_K = 1,17 \cdot \frac{115}{11} = 12,2 \text{ ка}.$$

Произведем оценку влияния регулирования у Т-1 и ЛРА.

Пределы регулирования у Т-1 составляют  $\beta = 0,84 \div 1,16$ , чему соответствует  $\alpha = 1/\beta = 1/0,84 \div 1/1,16 = 1,19 \div 0,863$ . Теперь по (2.29) и (2.30) найдем значения искомых отклонений: при коротком замыкании в К-1 отношение  $n = \frac{24}{35,5+20,5} = 0,43$ , при котором отклонения в токе в месте короткого замыкания составляют от

$$B_I = \frac{I_{I(\alpha=0,863)}}{I_{I(\alpha=1)}} = \frac{0,863(1+0,43)}{1+0,863^2 \cdot 0,43} = 0,93$$

до

$$B_I = \frac{I_{I(\alpha=1,19)}}{I_{I(\alpha=1)}} = \frac{1,19(1+0,43)}{1+1,19^2 \cdot 0,43} = 1,06$$

и в токе линии Л-1

от  $B_{II} = 0,863 \cdot 0,93 = 0,8$  до  $B_{II} = 1,19 \cdot 1,06 = 1,26$ .

Аналогичный подсчет при коротком замыкании в К-2 дает для тока в месте короткого замыкания и в линии Л-2  $B_I = 0,89 \div 1,14$  и тока в линии Л-1  $B_{II} = 0,77 \div 1,36$ ; то же при коротком замыкании в К-3 для тока в месте короткого замыкания  $B_I = 0,95 \div 1,04$  и тока в линии Л-1  $B_{II} = 0,80 \div 1,24$ .

В последнем случае, если дополнительно учесть регулирование на ЛРА (введя, конечно, и его реактивность), величина тока в месте короткого замыкания может изменяться в пределах 8,3–11 ка.

#### б) Приближенное приведение в именованных единицах

В соответствии с рекомендованной шкалой принимаем, что средние номинальное напряжение ступеней заданной схемы составляют: 110; 37; 10,5 и 6,3 кВ. В качестве основной сохраним ступень, где включен источник; при этом, очевидно, реактивности  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и  $x$  останутся теми же, а остальные будут:

$$x_5 = 0,4 \cdot 10 \cdot \left(\frac{115}{37}\right)^2 = 38,7 \text{ ом} \quad \text{и} \quad x_6 = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{115^2}{6,3} = 157 \text{ ом}$$

Величины токов при коротких замыканиях:

в К-1

$$I_K = \frac{67,5}{24 + 35,5 + 20,5} \cdot \left(\frac{115}{37}\right) = 2,63 \text{ ка (примерно больше на 4%);}$$

в К-2

$$I_K = \frac{67,5}{80 + 38,7 + 157} \cdot \left( \frac{115}{6,3} \right) = 4,46 \text{ ка (примерно больше на 2\%);}$$

в К-3

$$I_K = \frac{67,5}{24 + 35,5 - 0,83} \cdot \left( \frac{115}{10,5} \right) = 12,8 \text{ ка (больше на 6,5\%).}$$

в) Точное приведение в относительных единицах

Примем  $S_6 = 1000 \text{ Мва}$  и на ступени II  $U_{6II} = 115 \text{ кв.}$  Тогда  $I_{6II} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5 \text{ ка}$  и на других ступенях базисные напряжения и токи будут:

$$U_{6I} = 115 \cdot \frac{38,5}{115} = 38,5 \text{ кв; } I_{6I} = 5 \cdot \frac{115}{38,5} = 15 \text{ ка;}$$

$$U_{6III} = 38,5 \cdot \frac{6,6}{35} = 7,25 \text{ кв; } I_{6III} = 15 \cdot \frac{35}{6,6} = 79,5 \text{ ка;}$$

$$U_{6IV} = 115 \cdot \frac{11}{115} = 11 \text{ кв; } I_{6IV} = 5 \cdot \frac{115}{11} = 52,3 \text{ ка.}$$

Пользуясь соответствующими выражениями, находим:

$$x_1 = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,82; \quad x_2 = 0,1075 \cdot \frac{1000}{40} = 2,69;$$

$$\text{аналогично } x_3 = 1,56 \text{ и } x_4 = -0,06; \quad x_5 = 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{1000}{38,5^2} = 2,7;$$

$$\text{и } x_6 = 0,075 \cdot \frac{1000}{6,3} \cdot \left( \frac{35}{38,5} \right)^2 = 9,83;$$

относительное напряжение источника

$$U_C = \frac{117}{115} = 1,02.$$

При коротком замыкании а К-1 величина относительного тока будет:

$$I = \frac{1,02}{1,82 + 2,69 + 1,56} = \frac{1,02}{6,07} = 0,169.$$

Значения токов на ступени соответствующего напряжения будут:  
в линии Л-1

$$I = 0,169 \cdot 5 = 0,845 \text{ ка,}$$

в месте короткого замыкания

$$I_K = 0,169 \cdot 15 = 2,53 \text{ ка.}$$

При коротком замыкании в К-2

$$I_* = \frac{1,02}{6,07 + 2,69 + 9,83} = \frac{1,02}{18,6} = 0,055;$$

ток в линии Л-1

$$I = 0,055 \cdot 5 = 0,275 \text{ ка;}$$

ток в линии Л-2

$$I = 0,055 \cdot 15 = 0,82 \text{ ка};$$

в месте короткого замыкания

$$I_K = 0,055 \cdot 79,5 = 4,35 \text{ ка}.$$

При коротком замыкании в К-3

$$I_* = \frac{1,02}{1,82 + 2,69 - 0,06} = \frac{1,02}{4,45} = 0,23;$$

ток в линии Л-1

$$I = 0,23 \cdot 5 = 1,15 \text{ ка};$$

в месте короткого замыкания

$$I_K = 0,23 \cdot 52,3 = 12 \text{ ка}.$$

Все полученные величины токов, как и следовало ожидать, совпадают соответственно с теми, которые были найдены при точном решении в именованных единицах.

Рекомендуется читателю самостоятельно убедиться в тождественности результатов приближенного определения токов в именованных и относительных единицах.

Учет вольтодобавочного регулировочного трансформатора показан в решении примера 2.3.

## 2.5 Преобразование схем замещения

В частном случае, когда схема замещения не содержит замкнутых контуров и в ней имеется один или несколько источников с одинаковыми э. д. с, ее можно легко привести к простейшему виду путем элементарных преобразований последовательного и параллельного сложения элементов). В общем же случае для такого приведения используют ряд дополнительных преобразований, как в обычных расчетах линейных электрических цепей. К ним относятся преобразования треугольника в звезду или обратно, многолучевой звезды в полный (с диагоналями) многоугольник, замена нескольких генерирующих ветвей с разными э. д. с, присоединенных к общему узлу, одной эквивалентной. Формулы таких преобразований для справки помещены в приложении П-1.

Приведем ряд указаний и рекомендаций, которыми следует руководствоваться при преобразовании схем в ходе выполнения расчетов, учитывая некоторые специфические особенности последних.

Первоочередной задачей расчета коротких замыканий обычно является нахождение тока непосредственно в аварийной ветви или в месте короткого замыкания. Поэтому преобразование схемы выгодно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразования или в крайнем случае участвовала в нем только на последних его этапах. С этой целью, в частности, концы нагрузочных ветвей, э. д. с. которых принимаются равными нулю, не следует соединять с точкой трехфазного короткого замыкания, а лучше эти ветви объединять с генераторами в эквивалентные ветви.

Когда металлическое трехфазное короткое замыкание находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями (рис. 2.4,а), этот узел можно разрезать, сохранив на конце каждой образовавшейся ветви такое же короткое замыкание (рис. 2.4,б). Далее полученную схему нетрудно преобразовать относительно любой из точек короткого замыкания, учитывая другие ветви с короткими замыканиями как обычные нагрузочные ветви с э. д. с, равными нулю. Такой прием особенно эффективен, когда нужно найти ток в одной из ветвей, присоединенных к узлу короткого замыкания.



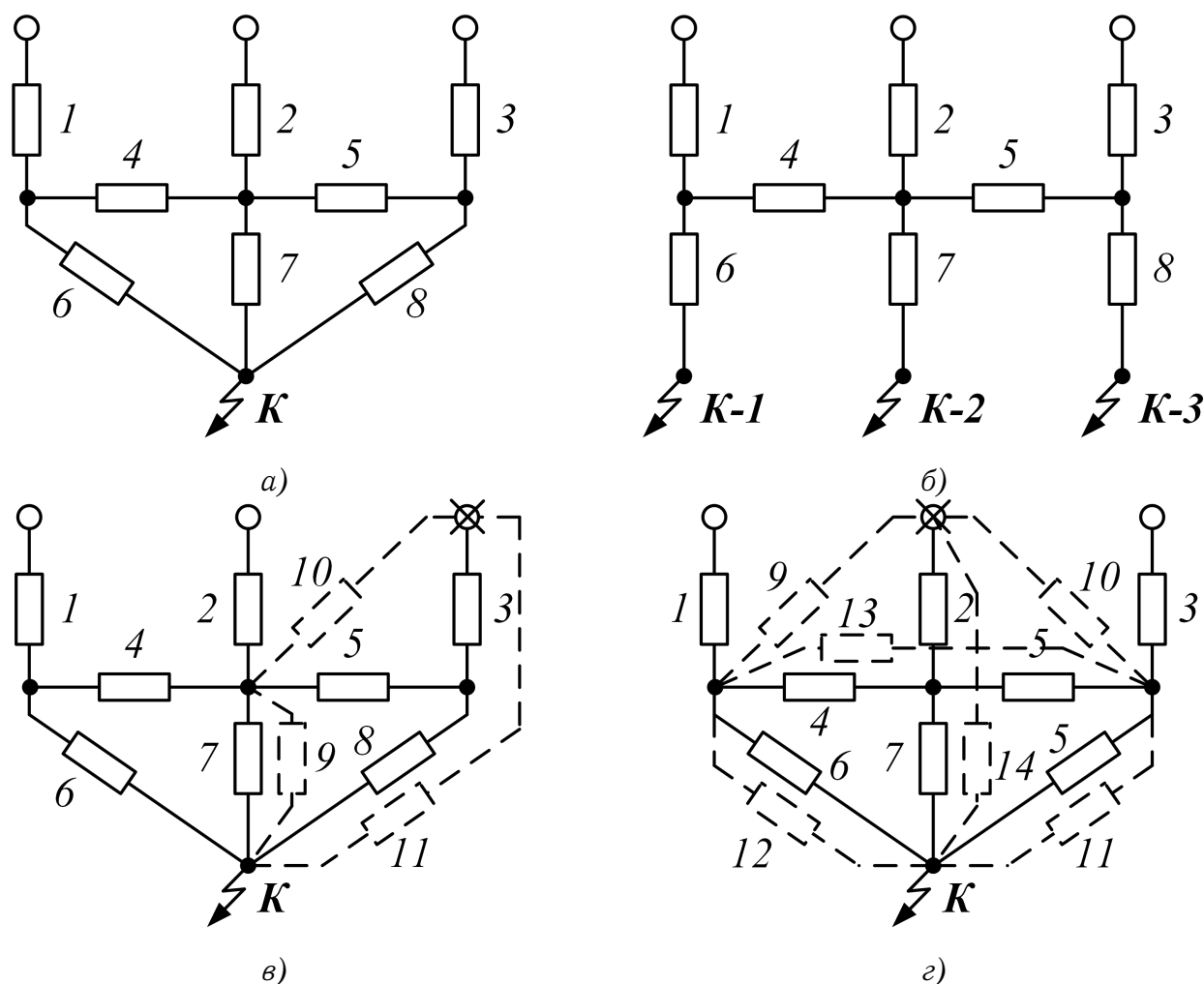


Рис. 2.4: Пример преобразования схемы: *а* — исходная схема; *б* — после рассечения в узле короткого замыкания; *в* и *г* — этапы преобразования схемы.

Довольно часто встречается симметрия схемы относительно точки короткого замыкания или симметрия какого-нибудь участка схемы относительно некоторой промежуточной точки. Использование этого обстоятельства позволяет значительно упростить преобразование схемы. Так, например, пусть в схеме рис. 2.4, *а* элементы, расположенные симметрично относительно элемента 7, одинаковы. Тогда, очевидно, потенциалы узлов, где присоединены ветви 1 и 3, также одинаковы, что позволяет эти узлы закоротить и образовавшиеся параллельные ветви 1 и 3, 4 и 5, 6 и 8 заменить эквивалентными. Вместо двух контуров схема теперь содержит один контур, преобразовав который в эквивалентную звезду, уже совсем легко привести схему к элементарному виду. Если в схеме рис. 2.4, *а* генерирующие ветви 1, 2 и 3 одинаковы, а также одинаковы элементы 6, 7 и 5, то наличие элементов 4 и 5 при рассматриваемом положении точки короткого замыкания никак не сказывается, т. е. каждая генерирующая ветвь с соответствующим ей элементом (6, 7, 8) является независимой.

В общем случае, когда элементы схемы рис. 2.4, *а* различны, для ее упрощения можно одну из трехлучевых звезд с элементами 1, 4, 6 или 3, 5, 8 заменить эквивалентным треугольником (рис. 2.4, *в*), затем разрезать его вершину, где приложена э. д. е., и образовавшиеся параллельные ветви (2 и 10, 7 и 9) заменить эквивалентными. Еще одно преобразование оставшегося треугольника с последующим параллельным и последовательным сложением ветвей быстро приводит к цели. При желании можно четырехлучевую звезду 2, 4, 5, 7 схемы рис. 2.4, *а* преобразовать в четырехугольник с диагоналями (рис. 2.4, *г*), а

затем разрезать его вершину, где приложена э. д. е., и произвести замену параллельных ветвей. Однако в данном примере, как видно, такое преобразование не имеет преимуществ по сравнению с рассмотренным выше, хотя нужно заметить, что в более сложных схемах оно оказывается весьма эффективным, а иногда даже единственно возможным приемом упрощения схемы.

Все сказанное также относится к выполнению преобразований схем для расчета и других повреждений, как-то: обрыв проводов, одновременные повреждения в нескольких точках и т. д.; причем если повреждения сопровождаются возникновением несимметрии трехфазной системы, то аналогичным преобразованиям подвергают схемы замещения всех последовательностей. Отметим, что при повреждении в двух точках элементарной схемой, к которой может быть приведена исходная схема, является либо треугольник, либо эквивалентная ему звезда (см. § 16-4).

С помощью расчетной модели суммарное или результирующее сопротивление схемы относительно любой ее точки легко находят непосредственным измерением. На ней также можно замерить сопротивления, по которым нетрудно определить параметры элементарной схемы при одновременных повреждениях в двух точках заданной системы.

## 2.6 Применение принципа наложения

В практических расчетах линейных электрических цепей часто представляется удобным использовать принцип наложения, согласно которому действительный режим можно получить как результат наложения ряда условных режимов, каждый из которых определяется в предположении, что в схеме приложена только одна (или группа) э. д. с, в то время как все остальные равны нулю; при этом все элементы схемы остаются включенными. Расчет каждого из таких условных режимов представляет более простую задачу. Использование принципа наложения в такой обычной форме при достаточно большом числе различных э. д. с. в схеме становится громоздким и неудобным. Поэтому обычно на практике используют следующие формы принципа наложения.

### *а) Наложение собственно аварийного режима на предшествующий*

Условия трехфазного короткого замыкания не изменятся, если представить, что в точке короткого замыкания приложены две равные, но взаимно противоположные э. д. с. Их величина, вообще говоря, может быть произвольной; в частности, ее можно принять равной напряжению, которое было в этой точке до возникновения в ней короткого замыкания. Если генераторы введены в схему своими э. д. с, которые у них были до короткого замыкания, то режим после возникновения короткого замыкания удобно представить состоящим из двух режимов. Один из них целесообразно получить, учитывая все э. д. с. и дополнительно введенную в точку короткого замыкания э. д. с, равную  $+U_{K0}$ . Одновременное действие этих э. д. с, очевидно, дает предшествующий режим в данной схеме. Второй режим получается от действия только одной э. д. с, приложенной в точке короткого замыкания и равной  $-U_{K0}$ . Его называют собственно аварийным режимом, а получающиеся при нем токи и напряжения – аварийными составляющими соответственно токов и напряжений.

Таким образом, суммируя предшествующие величины с собственно аварийными составляющими, получаем действительные величины при трехфазном коротком замыкании, т. е.

$$\dot{I} = \dot{I}_0 + \dot{I}_{AB}; \quad (2.33)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{AB}. \quad (2.34)$$

Здесь  $U < \dot{U}_0$ , поскольку  $U_{AB} < 0$ . Что касается токов, то в генераторах  $I_{AB}$  имеют одно направление с  $I_0$ , а во всех прочих ветвях эти токи могут иметь как одинаковые, так и разные направления.

Использование такой формы наложения особенно эффективно в случаях, когда предшествующий режим уже известен; при этом задача сводится к сравнительно более простому расчету только собственно аварийного режима. На практике часто допускают наложение собственно аварийного режима, полученного для чисто индуктивной схемы, на предшествующий режим, который соответствует схеме с полными сопротивлениями ее элементов. Разумеется, такое наложение принципиально неточно, однако в большинстве случаев им можно пользоваться, поскольку получающиеся ошибки незначительны<sup>6</sup>.

Нужно подчеркнуть, что если собственно аварийные составляющие токов отдельных ветвей в общем случае являются фиктивными токами, то сумма этих составляющих генераторных и нагрузочных ветвей образует действительный ток в месте короткого замыкания, так как в нем до возникновения короткого замыкания ток отсутствовал. Поэтому когда задача ограничена определением тока только в месте короткого замыкания, то его можно найти, исходя из предшествующего напряжения в аварийной точке, причем если последнее неизвестно, то, вообще говоря, им можно задаться, имея в виду, что в нормальном режиме отклонения напряжения сравнительно малы.

Рассматриваемую форму принципа наложения также можно использовать в расчетах простых и сложных несимметричных режимов (см. § 13-5).

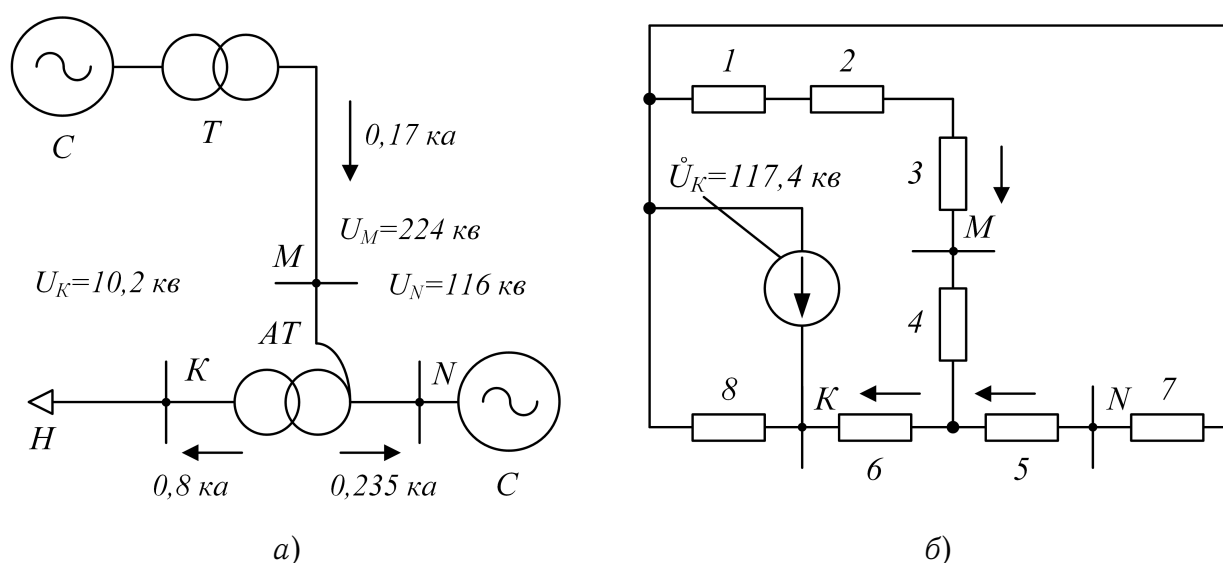


Рис. 2.5: К примеру ??-2

**Пример ??-3.** Для схемы рис. 2.5,а известны величины токов (ка) и напряжений (кв) предшествующего режима; они указаны на самой схеме.

При трехфазном коротком замыкании в точке К определить для начального момента периодическую составляющую тока в месте короткого замыкания и цепях автотрансформатора АТ; кроме того, для тех же условий найти линейные напряжения в точках М и N. Для упрощения считать, что заданные токи чисто индуктивные.

<sup>6</sup>Это объясняется тем, что аварийные составляющие токов обычно много больше токов предшествующего режима.

Генератор  $G$  194 Мва; 18 кВ;  $x_d'' = 0,235^*$

Трансформатор  $T$  200 Мва; 242/18 кВ;  $u_K = 12\%$ .

Автотрансформатор  $AT$  125 Мва; 220/121/11 кВ;  $u_{BC} = 10,5\%$ ;  $u_{BH} = 36,3\%$ ,  $u_{CH} = 23\%$ .

Линия 135 км;  $x = 0,4$  ом/км.

Система  $C$  — эквивалентная реактивность  $x = 10$  ом.

Проведем решение в именованных единицах, выбрав в качестве основной ступень линии передачи.

Схема замещения для собственно аварийного режима представлена на рис. 2.5,б. Введенное в нее напряжение в точке короткого замыкания определено как

$$\overset{\circ}{U} = -\frac{10,2}{\sqrt{3}} \cdot -117,4 \text{ кВ.}$$

Реактивности всех элементов схемы рис. 2.5,б составляют  $x_1 = 71$  ом;  $x_2 = 35,2$  ом;  $x_3 = 54$  ом;  $x_4 = 46$  ом;  $x_5 = -5,4$  ом;  $x_6 = 94,5$  ом;  $x_7 = 33,2$  ом;  $x_8 = \frac{10,2}{2 \cdot 0,8} \cdot \left(\frac{220}{11}\right)^2 = 2940$  ом.

Определим результирующую реактивность схемы относительно точки  $K$ :  $x_9 = 71 + 35,2 + 54 + 46 = 206,2$  ом;  $x_{10} = 33,2 - 5,4 = 27,8$  ом;  $x_{11} = 206,2 // 27,8 = 24,5$  ом;  $x_{12} = 24,5 + 94,5 = 119$  ом; и  $x_{\Sigma} = 119 // 2940 = 114$  ом\*\*.

Ток в месте короткого замыкания  $\overset{\circ}{I}_K = \frac{0 - (-117,4)}{114} = 1,03$  ка и его истинное значение  $I_K = 1,03 \cdot \frac{220}{11} = 20,6$  ка.

Распределение собственно аварийной составляющей тока будет:

$$I_{ав8} = \frac{-117,4}{2940} = -0,04 \text{ ка; } I_{ав6} = 1,03 - 0,04 = 0,99 \text{ ка;}$$

$$I_{ав5} = 0,99 \cdot \frac{24,5}{27,8} = 0,87 \text{ ка; } I_{ав4} = 0,99 - 0,87 = 0,12 \text{ ка.}$$

Искомые токи будут:

на стороне высшего напряжения  $I = 0,12 + 0,17 = 0,29$  ка;

на стороне среднего напряжения  $I = 0,87 \frac{220}{121} - 0,235 = 1,345$  ка;

на стороне низшего напряжения  $I = 0,99 \frac{220}{11} + 0,8 = 20,6$  ка, т. е. как и следовало ожидать, та же величина, что и в месте короткого замыкания.

Аварийные составляющие напряжений:

в точке  $M$

$$U_{авM} = -0,12(71 + 35,2 + 54) = -19,2 \text{ кВ;}$$

в точке  $N$

$$U_{авN} = -0,87 \cdot 33,2 = -28,9 \text{ кВ.}$$

Искомые величины линейных напряжений будут:

в точке  $M$

$$U_M = 224 - \sqrt{3} \cdot 19,2 = 191 \text{ кВ (снижение примерно на 15%);}$$

в точке  $N$

$$U_N = 116 - \sqrt{3} \cdot 28,9 \cdot \frac{121}{220} = 88,5 \text{ кВ (снижение примерно на 24%);}$$

б) Применение собственных и взаимных сопротивлений и проводимостей

\*Эта реактивность характеризует генератор в начальный момент переходного процесса (см. § 6-2 и 6-3).

\*\*Знак // — условная запись параллельного сложения ветвей.

В схеме с произвольным числом источников с э. д. с.  $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dots, \dot{E}_n$  для тока, например, источника  $I$ , считая положительным напряжением тока от источника к внешней сети, по принципу наложения можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12} - \dot{I}_{13} - \dots - \dot{I}_{1n} &= \frac{\dot{E}_1}{Z_{11}} - \frac{\dot{E}_2}{Z_{12}} - \frac{\dot{E}_3}{Z_{13}} - \\ &- \dots - \frac{\dot{E}_n}{Z_{1n}} = Y_{11}\dot{E}_1 - Y_{12}\dot{E}_2 - Y_{13}\dot{E}_3 - \\ &- \dots - Y_{1n}\dot{E}_n, \end{aligned} \quad (2.35)$$

где каждый из токов обусловлен действием лишь одной э. д. с. при равенстве нулю всех прочих, т. е.

$\dot{I}_{11} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{11}} = Y_{11}\dot{E}_1$  — собственный ток источника  $I$ , созданный только его э. д. с.  $\dot{E}_1$ ;

$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{E}_2}{Z_{12}} = Y_{12}\dot{E}_2$  — взаимный ток источника  $I$ , вызванный только э. д. с.  $\dot{E}_2$  и т. д.

Здесь  $Z_{11}, Z_{12}, \dots, Z_{1n}$  и  $Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1n}$  — соответственно собственные и взаимные сопротивления и проводимости источника  $I$  в рассматриваемой схеме.

Аналогично для тока в месте короткого замыкания имеем:

$$\begin{aligned} \dot{I}_K &= \frac{\dot{E}_1}{Z_{1K}} + \frac{\dot{E}_2}{Z_{2K}} + \dots + \frac{\dot{E}_n}{Z_{nK}} = \\ &= Y_{1K}\dot{E}_1 + Y_{2K}\dot{E}_2 + \dots + Y_{nK}\dot{E}_n, \end{aligned} \quad (2.36)$$

где  $Z_{1K}, Z_{2K}, \dots, Z_{nK}$  и  $Y_{1K}, Y_{2K}, \dots, Y_{nK}$  — взаимные сопротивления и проводимости между каждым источником и точкой короткого замыкания.

Выражения (2.35) и (2.36) особенно удобны, когда требуется выявить индивидуальные свойства отдельных источников или учесть влияние изменения величины и фазы отдельных э. д. с. на искомые значения токов.

Собственные и взаимные сопротивления или проводимости находят с помощью так называемого способа токораспределения или путем постепенного преобразования заданной схемы. Оба эти приема иногда целесообразно использовать совместно, т. е. вначале произвести ряд преобразований схемы, а затем применить способ токораспределения. Сущность и применение этих приемов ниже иллюстрировано на конкретном примере.

В расчетах коротких замыканий часто приходится определять только взаимные сопротивления между точкой короткого замыкания и отдельными источниками (или группами их). Для этого удобно использовать следующий прием. Приняв ток в месте короткого замыкания за единицу и считая все приведенные э. д. с. одинаковыми, нужно произвести распределение этого тока (равного единице) в заданной схеме. Полученные доли этой единицы для отдельных источников:  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , называемые коэффициентами распределения, при отсутствии нагрузок в схеме характеризуют долю участия каждого источника<sup>7</sup> в питании короткого замыкания. Далее, если результирующее сопротивление схемы относительно места короткого замыкания  $Z_\Sigma$ , то, очевидно, можно записать равенства:

$$C_1 Z_{1K} = C_2 Z_{2K} = \dots = C_n Z_{nK} = 1 \cdot Z_\Sigma,$$

<sup>7</sup>Как отмечалось выше, при равенстве их приведенных э. д. с.

откуда искомое взаимное сопротивление между точкой короткого замыкания и соответствующим источником будет:

$$Z_{nK} = \frac{Z_{\Sigma}}{C_n}. \quad (2.37)$$

Нетрудно убедиться, что для нахождения собственного сопротивления каждого источника достаточно сложить параллельно все его взаимные сопротивления.

Расчетная модель позволяет значительно скорее и проще найти собственные и взаимные сопротивления и коэффициенты распределения. Попутно отметим, что последние особенно удобны для определения распределения токов обратной и нулевой последовательностей (см. §13-5).

*Пример ??-4.* Для схемы рис. 2.6,а, где у каждого элемента указана его реактивность, требуется определить:

- величины собственной реактивности относительно узла 1 и взаимных реактивностей между этим узлом и узлами 2, 3, 4 и 5, используя способ токораспределения;
- те же величины используя способ преобразования схемы;
- коэффициенты распределения и взаимные реактивности между точками 1, 2, 4, 5 (где имеются источники) и точкой 3 (где предполагается потенциал, равный нулю).

Проведем решение в указанной последовательности.

- Считаем, что только в точке 1 расположена некоторая э. д. с. Через остальные конечные точки осуществляем замкнутый контур (рис. 2.6,б). Пусть  $I_3 = 1$ ; тогда напряжение  $U_b = 1,5$  и токи  $I_2 = \frac{1,5}{1,74} = 0,86$  и  $I_4 = 1,5/0,79 = 1,9$ ; на участке  $ab$   $I_{ab} = 1 + 1,9 + 0,86 = 3,76$ . Напряжение  $U_a = 1,5 + 0,5 \cdot 3,76 = 3,38$ ; токи  $I_5 = 3,38/4,56 = 0,74$  и  $I_1 = 3,76 + 0,74 = 4,5$ ; э. д. с.  $E_1 = 3,38 + 4,5 \cdot 0,4 = 5,2$ .

Искомые реактивности будут:  $x_{11} = 5,2/4,5 = 1,15$ ;  $x_{12} = 5,2/0,86 = 6,05$ ;  $x_{13} = 5,2$ ;  $x_{14} = 5,2/1,9 = 2,74$  и  $x_{15} = 5,2/0,74 = 7$ . Читатель может убедиться, что  $x_{12}/x_{13}/x_{14}/x_{15} = 6,05/5,2/2,74/7 = 1,15 = x_{11}$ .

- Преобразуем звезду в треугольник с вершинами 1, b, 5 (рис. 2.6,в);  $x_{1b} = 0,4 + 0,5 + (0,4 \cdot 0,5/4,56) = 0,94$ ;  $x'_{15} = 0,4 + 4,56 + (0,4 \cdot 4,56/0,5) = 8,61$  и  $x_{5b} = 0,5 + 4,56 + (0,5 \cdot 4,56/0,4) = 10,76$ . Как видно из рис. 2.6,г, образовалась пятилучевая звезда с центром b. Теперь, используя формулы преобразования многолучевой звезды в многоугольник (см. приложение П-1), находим суммарную проводимость всех лучей звезды

$$\sum Y = \frac{1}{0,94} + \frac{1}{1,74} + \frac{1}{1,5} + \frac{1}{0,79} + \frac{1}{10,76} = 3,66$$

и затем искомые реактивности:

$$x_{12} = 0,94 \cdot 1,74 \cdot 3,66 = 6,05; \quad x_{13} = 0,94 \cdot 1,5 \cdot 3,66 = 5,2; \quad x_{14} = 0,94 \cdot 0,79 \cdot 3,66 = 2,74;$$

при определении  $x_{15}$  должна быть учтена еще дополнительно параллельная ветвь  $x'_{15} = 8,61$ , т. е.

$$x_{15} = 0,94 \cdot 10,76 \cdot 3,66 / 8,61 = 7.$$

Разумеется результат тот же, что был получен выше.

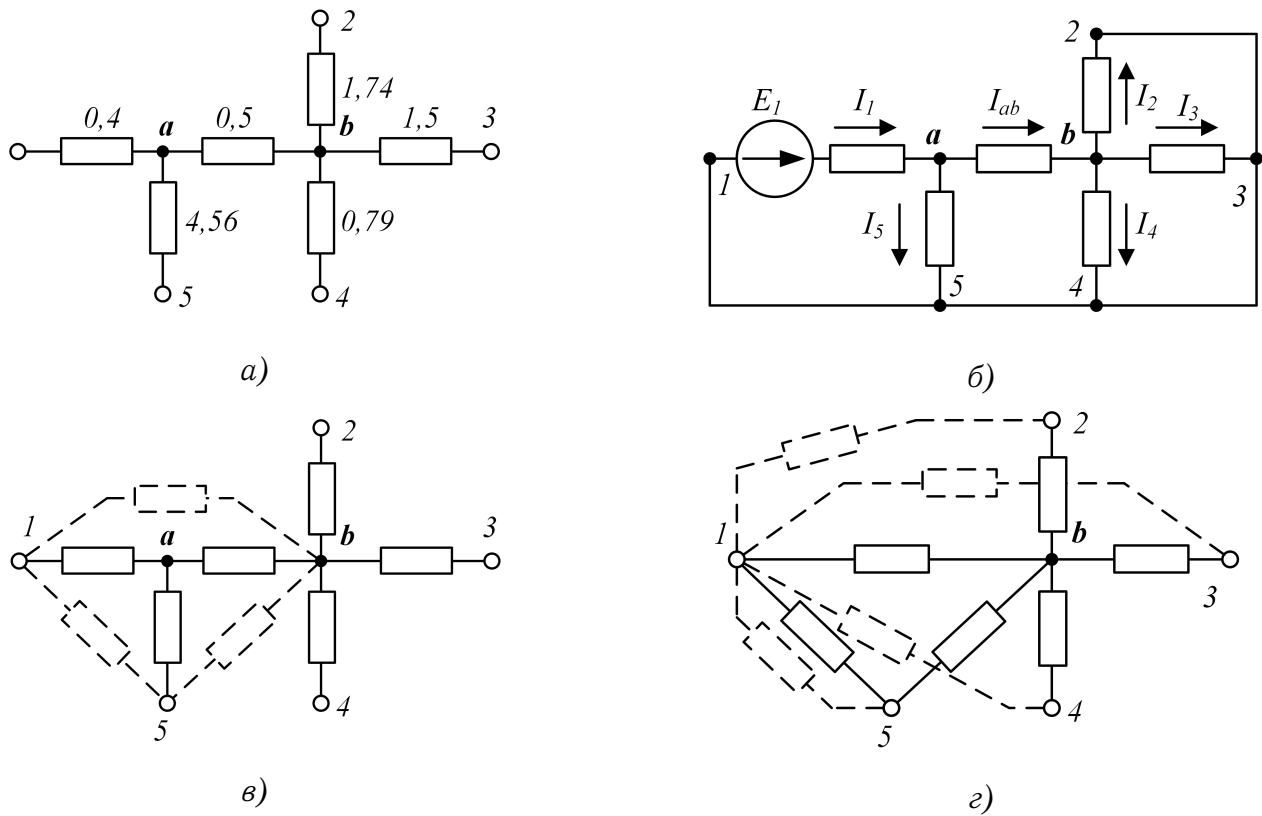


Рис. 2.6: К примеру ??-4: *а* — исходная схема; *б* — к применению способа токораспределения; *в* и *г* — этапы преобразования схемы.

в) Определим сначала результирующую реактивность схемы относительно точки 3:

$$\begin{aligned} x_7 &= 0,4/4,56 = 0,37; & x_8 &= 0,37 + 0,5 = 0,87; \\ x_9 &= 0,87/1,74/0,79 = 0,335 & x_{\Sigma} &= 0,335 + 1,5 = 1,835. \end{aligned}$$

Примем  $I_3 = C_3 = 1$ ; тогда остальные коэффициенты распределения будут:  $C_2 = 1 \cdot 0,335/1,74 = 0,193$ ;  $C_4 = 1 \cdot 0,335/0,79 = 0,424$ ;  $C_1 + C_5 = 1 \cdot 0,335/0,87 = 0,383$  (или  $1 - 0,193 - 0,424 = 0,383$ ); наконец,  $C_1 = 0,383 \cdot 0,37/0,4 = 0,354$  и  $C_5 = 0,383 - 0,354 = 0,029$ .

Искомые взаимные реактивности найдем по (2.37), т. е.

$$\begin{aligned} x_{13} &= \frac{1,835}{0,354} = 5,2 \text{ (то же значение, что и ранее);} \\ x_{23} &= \frac{1,835}{0,193} = 9,55; & x_{43} &= \frac{1,835}{0,424} = 4,34; & x_{53} &= \frac{1,835}{0,029} = 63,3. \end{aligned}$$

Легко проверить, что те же взаимные реактивности получим, применяя предыдущие способы их определения. Так, например,  $x_{23}$  является стороной многоугольника между вершинами 2 и 3, т. е.  $x_{23} = 1,74 \cdot 1,5 \cdot 3,66 = 9,55$  и т. д.

## 2.7 Мощность короткого замыкания

Отключающую способность выключателя при номинальном его напряжении  $U_n$  характеризуют номинальным отключаемым током  $I_{от.н}$  или пропорциональной ему номинальной отключаемой мощностью:

$$S_{\text{от.н}} = \sqrt{3}U_{\text{н}}I_{\text{от.н}}.$$

Соответственно, когда проверка выключателя производится по отключаемой мощности, последняя должна быть сопоставлена с так называемой мощностью короткого замыкания, которая независимо от вида короткого замыкания условно определяется как

$$S_{\text{кт}} = \sqrt{3}U_{\text{н}}I_{\text{кт}}, \quad (2.38)$$

где  $I_{\text{кт}}$  — ток короткого замыкания в момент  $t$  размыкания контактов выключателя;  $U_{\text{н}}$  — номинальное напряжение ступени, для которой найден ток короткого замыкания.

Имея в виду, что при одних и тех же базисных условиях численные значения относительных токов и мощностей короткого замыкания одинаковы:

$$S_{\text{к(б)}} = I_{\text{к(б)}}, \quad (2.39)$$

представляется возможным вести расчет непосредственно для мощностей короткого замыкания.

При этом во избежание ошибок при выборе или проверке выключателей нужно помнить, что отключаемая мощность выключателя в общем случае не постоянна, а зависит от напряжения, при котором он работает.



## **Часть II**

### **Электромагнитные переходные процессы при сохранении симметрии трехфазной цепи**



## Глава 3

# Переходный процесс в простейших трехфазных цепях

### 3.1 Постановка задачи и ее ограничения

Симметричную трехфазную цепь с сосредоточенными активными сопротивлениями и индуктивностями при отсутствии в ней трансформаторных связей условимся называть **простейшей** трехфазной цепью.

Электромагнитный переходный процесс в такой цепи рассмотрим сначала при условии, что ее питание осуществляется от источника, сопротивление которого равно нулю и его напряжение, изменяясь с постоянной частотой, имеет неизменную амплитуду<sup>1</sup>. Обычно его называют источником бесконечной мощности.

Включение в схему такого источника, вообще говоря, соответствует теоретическому пределу, когда изменение внешних условий не влияет на работу самого источника. Практически это имеет место, например, при коротких замыканиях в относительно маломощных электрических установках или протяженных сетях, питаемых от крупных энергетических систем (см. **гл. 17**).

С исследованием переходных процессов в подобных условиях читатель знаком из курса теоретических основ электротехники. Поэтому задачей данной главы является кратко напомнить основные выводы такого исследования, отметить особенности многофазной цепи по сравнению с однофазной, привести некоторые упрощенные приемы расчета и обратить внимание на влияние ряда факторов.

### 3.2 Трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи

Обратимся к рис. 3.1, на котором представлена простейшая симметричная трехфазная цепь. В ней условно принято, что на одном ее участке имеется взаимоиנדукция между фазами, а на другом она отсутствует. Цепь присоединена к источнику синусоидального напряжения с неизменными амплитудой и частотой.

Рассмотрим переходный процесс, вызванный включением выключателя  $B$ , за которым сделана закоротка, что равносильно возникновению металлического трехфазного короткого замыкания между двумя участками данной цепи.

Пусть векторы  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  (рис. 3.2) характеризуют предшествующий

---

<sup>1</sup>Применение чувствительного и быстродействующего автоматического регулирования возбуждения генераторов дополнительно способствует принятию указанного предположения.

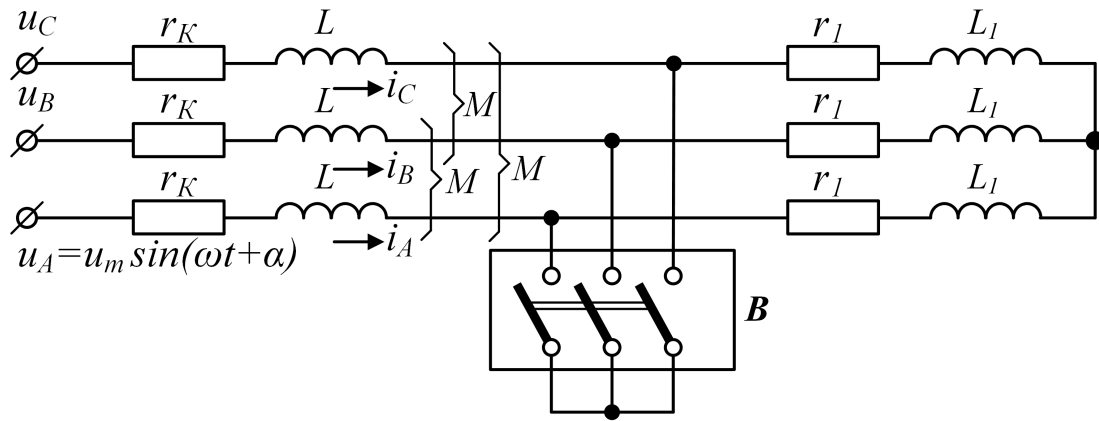


Рис. 3.1: Простейшая трехфазная электрическая цепь.

режим рассматриваемой цепи, а вертикаль  $tt$  является неподвижной линией времени, т. е. мгновенные значения отдельных величин определяются проекциями на эту линию соответствующих вращающихся векторов. Момент возникновения короткого замыкания будем фиксировать значением угла  $\alpha$  (т. е. фазой включения) между вектором напряжения фазы  $A$  и горизонталью. (рис. 3.2).

После включения выключателя  $B$  цепь рис. 3.1 распадается на два независимых друг от друга участка. Участок с  $r_l$  и  $L_l$  оказывается зашунтированным коротким замыканием и ток в нем будет поддерживаться лишь до тех пор, пока запасенная в индуктивности  $L_l$  энергия магнитного потока не перейдет в тепло, поглощаемое активным сопротивлением  $r_l$ .

Дифференциальное уравнение равновесия в каждой фазе этого участка имеет вид:

$$0 = ir_l + L_l \frac{di}{dt}. \quad (3.1)$$

Его решение общеизвестно:

$$i = i_0 e^{-t/T_{a1}}; \quad (3.2)$$

оно показывает, что здесь имеется лишь свободный ток, который затухает по экспоненте с постоянной времени

$$T_{a1} = \frac{L_l}{r_l} = \frac{x_l}{\omega r_l}, \text{ сек.} \quad (3.3)$$

Начальное значение свободного тока в каждой фазе зашунтированного участка цепи, очевидно, равно предшествовавшему мгновенному значению тока, поскольку в цепи с индуктивностью не может произойти внезапного (скачком) изменения тока. В общем случае свободные токи в фазах различны, хотя их затухание, разумеется, происходит с одной и той же постоянной времени. В одной из фаз свободный ток может вообще отсутствовать, если в момент возникновения короткого замыкания предшествовавший ток в этой фазе проходил через нуль; при этом свободные токи в двух других фазах будут одинаковы по величине, но противоположны по направлению.

На рис. 3.3 слева приведены кривые изменения фазных токов в зашунтированном участке рассматриваемой цепи, с учетом, что короткое замыкание произошло в момент, отвечающий положению векторов на рис. 3.2.

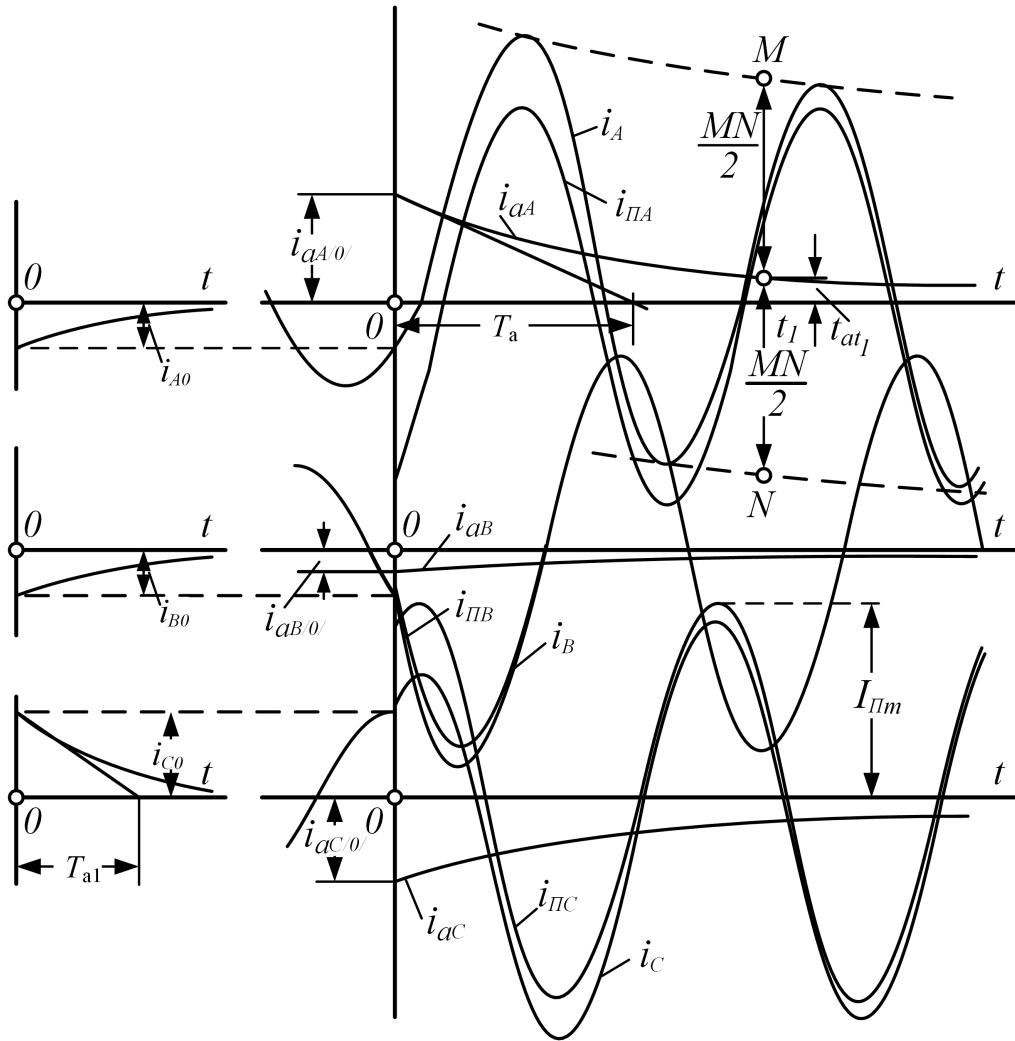


Рис. 3.3: Осциллограммы токов в фазах при внезапном трехфазном коротком замыкании в простейшей электрической цепи.

Напомним, что подкасательная в любой точке экспоненты<sup>2</sup> в принятом для оси времени масштабе дает значение постоянной времени, с которой происходит изменение экспоненты (рис. 3.3). Имея в виду, что при  $t = T_a$  значение  $e^{-1} = 0,368$ , постоянную  $T_a$  обычно трактуют как время, в течение которого переменная величина снижается до 0,368 своего начального значения; при этом за начальную может быть принята любая точка кривой.

Перейдем теперь к участку цепи, который остался присоединенным к источнику. Здесь помимо свободного тока будет новый принужденный ток, величина которого, очевидно, больше предыдущего и сдвиг по фазе которого в общем случае иной. Допустим, что векторы  $I_{\text{ПА}}$ ,  $I_{\text{ПВ}}$ ,  $I_{\text{ПС}}$  (рис. 3.2) отвечают новому установившемуся режиму данного участка цепи.

Дифференциальное уравнение равновесия для любой фазы, например фазы  $A$ , этого участка

$$u_A = i_A r_K + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt},$$

имея ввиду, что  $(i_B + i_C) = -i_A$ , можно представить (опуская индекс фазы) как

$$u = i r_K + L_K \frac{di}{dt}, \quad (3.1a)$$

<sup>2</sup>Обычно используют начальную часть экспоненты, где скорость изменения соответствующей величины больше и поэтому можно точнее провести касательную.

где  $L_K = (L - M)$  — результирующая индуктивность фазы, т. е. индуктивность с учетом влияния двух других фаз.

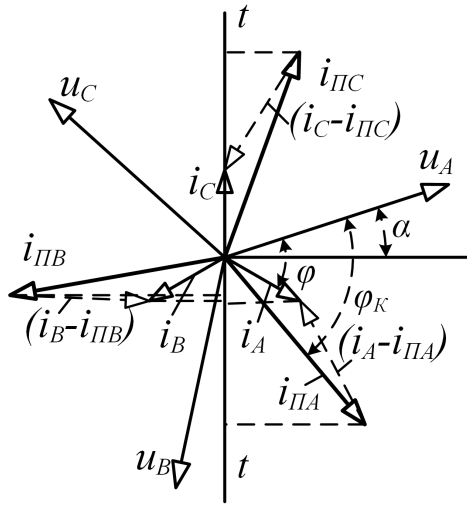


Рис. 3.2: Векторная диаграмма для начального момента трехфазного короткого замыкания. свободный ток; его называют также аperiodической слагающей тока. Начальное значение этой слагающей определяется из начальных условий, т. е.

Решение (3.1a) имеет вид:

$$i = \frac{U_m}{z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a|0|} e^{-t/T_a} \quad (3.2a)$$

где  $z_K$  — полное сопротивление присоединенного к источнику участка цепи или, короче, цепи короткого замыкания;

$\varphi_K$  — угол сдвига тока в этой цепи;

$T_a$  — постоянная времени цепи короткого замыкания, определяемая по (3.3), где вместо  $L_1, x_1, r_1$  следует ввести  $L_K, x_K, r_K$ .

Первый член правой части (3.2a) представляет периодическую слагающую тока, которая при рассматриваемых условиях является принужденным током с постоянной амплитудой  $I_{Пm} = U_m/z_K$ . Соответственно второй член представляет, как и раньше, затухающий по экспоненте ток.

$$i_0 = i_{П0} + i_{a0}, \quad (3.4)$$

откуда после подстановки соответствующих выражений имеем:

$$i_{a|0|} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{Пm} \sin(\alpha - \varphi_K). \quad (3.5)$$

Поскольку токи  $i_{П}$ ,  $i_0$  являются проекциями векторов  $\dot{I}_{Пm}$  и  $\dot{I}_m$  на линию времени, то ток  $i_{a|0|}$  также можно рассматривать как проекцию вектора  $(\dot{I}_m - \dot{I}_{Пm})$  на ту же линию (рис. 3.2). В зависимости от фазы включения  $\alpha$  начальное значение тока  $i_{a|0|}$  может изменяться от возможной наибольшей величины, когда вектор  $(\dot{I}_m - \dot{I}_{Пm})$  параллелен линии времени, до нуля, когда этот вектор нормален к ней. В трехфазной системе такие частные условия, разумеется, могут быть лишь в одной из фаз.

На рис. 3.3 справа представлены кривые изменения токов в фазах рассматриваемого участка при трехфазном коротком замыкании. Как видно, чем больше аperiodическая слагающая тока, тем больше смещение кривой полного тока относительно оси времени. Эту слагающую можно рассматривать как криволинейную ось симметрии кривой полного тока, из которой ее легко выделить. Для этого нужно сначала провести огибающие по максимальным положительным и отрицательным значениям заданной кривой тока (см. пунктирные линии у кривой тока фазы А на рис. 3.3). Каждая точка кривой аperiodической слагающей лежит посередине вертикального отрезка между этими огибающими.

Из (3.4) и рис. 3.2 следует, что наибольшее значение аperiodической слагающей тока определяется не только фазой включения, но также предшествующим режимом цепи. Так, например, при отсутствии предшествующего тока в данной цепи величина при отсутствии величина  $i_{a0}$  может достигать амплитуды периодической слагающей, если в момент короткого замыкания эта слагающая проходит через свой положительный или отрицательный максимум (рис. 3.4). Обычно этот случай рассматривается как расчетный<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Хотя возможны частные случаи, когда начальное значение аperiodической слагающей тока превышает амплитуду периодической слагающей.

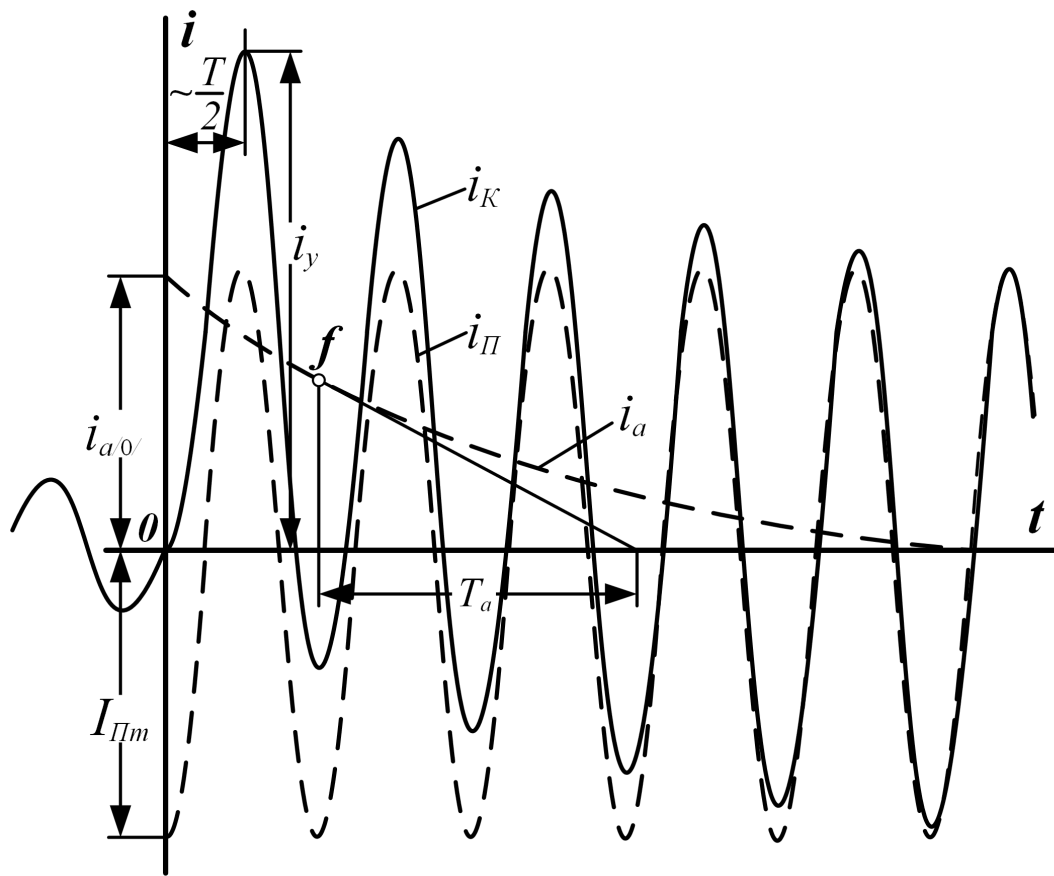


Рис. 3.4: Осциллограмма тока короткого замыкания при наибольшей апериодической составляющей.

Важно отметить, что фаза включения, при которой возникает наибольшее значение апериодической слагающей, еще не предопределяет того, что именно при ней будет максимум мгновенного значения полного тока. В самом деле, из (3.2а) и (3.5) при отсутствии предшествующего тока ( $I_m = 0$ ) следует, что полный ток в цепи короткого замыкания является функцией двух независимых переменных: времени  $t$  и фазы включения  $\alpha$  и выражается уравнением

$$i = I_{\text{пм}}[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{к}}) - \sin(\alpha - \varphi_{\text{к}})e^{-t/T_a}]. \quad (3.6)$$

Приравняв к нулю частные производные этого уравнения, т. е.

$$\frac{di}{dt} = \omega \cos(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{к}}) + \frac{1}{T_a} \sin(\alpha - \varphi_{\text{к}})e^{-t/T_a} = 0;$$

$$\frac{di}{d\alpha} = \cos(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{к}}) - \cos(\alpha - \varphi_{\text{к}})e^{-t/T_a} = 0,$$

и совместно решив эти уравнения, найдем, что максимум тока наступает при

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_{\text{к}}) = -\omega T_a = -\frac{x_{\text{к}}}{r_{\text{к}}} = \operatorname{tg}(-\varphi_{\text{к}}).$$

т. е. при  $\alpha = 0$ .

Следовательно, в предварительно разомкнутой цепи с  $r$  и  $L$  максимум мгновенного значения полного тока при коротком замыкании наступает, если в момент возникновения короткого замыкания напряжение источника проходит через нуль.

Для цепей с преобладающей индуктивностью  $\varphi_{\text{к}} \approx 90^\circ$ . поэтому условие возникновения наибольшей апериодической слагающей и условие, при котором достигается максимум мгновенного значения полного тока очень близки друг к другу. Поэтому в практических расчетах максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания, которое называют ударным током короткого замыкания  $i_y$ , обычно находят при наибольшем значении апериодической слагающей (рис. 3.4), считая, что он наступает приблизительно через полпериода, что при  $f = 50$  гц составляет около 0,01 сек с возникновения короткого замыкания.

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

$$i_y = I_{\text{пм}} + I_{\text{пм}}e^{-0,01/T_a} = k_y I_{\text{пм}}, \quad (3.7)$$

где

$$k_y = 1 + e^{-0,01/T_a}, \quad (3.8)$$

который называют ударным коэффициентом, показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагающей; его величина находится в пределах

$$1 < k_y < 2,$$

что соответствует предельным значениям  $T_a$ , т. е.  $T_a = 0$  (при  $L_{\text{к}} = 0$ ) и  $T_a = \infty$  (при  $r_{\text{к}} = 0$ ).

Естественно, чем меньше  $T_a$ , тем быстрее затухает апериодическая слагающая и тем соответственно меньше ударный коэффициент. Влияние этой слагающей сказывается лишь в начальной стадии переходного процесса; в сетях и установках высокого напряжения она практически исчезает спустя 0,1–0,3 сек, а в установках низкого напряжения она практически совсем незаметна.



Еще раз подчеркнем, что апериодические слагающие токов в фазах различны. Поэтому определение трехфазного короткого замыкания как симметричного, строго говоря, справедливо применительно к периодическим слагающим фазных токов.

### 3.3 Действующие значения полных величин и их отдельных слагающих

Прежде всего оговорим условность принятой терминологии. Она заключается в том, что действующее значение, например, тока в произвольный момент переходного процесса, будем иметь в виду, что оно определится как среднеквадратичное значение за один период  $T$ , в середине которого находится рассматриваемый момент. В соответствии с этим при известной зависимости  $i = f(t)$  для действующего значения тока в момент  $t$  можно написать:

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i^2 dt}. \quad (3.9)$$

Зависимость  $i = f(t)$  в общем случае очень сложна. Поэтому для упрощения подсчета  $I_t$  принимают, что за рассматриваемый период обе слагающие тока не изменяются, т. е. амплитуда периодической слагающей и апериодическая слагающая неизменны, каждая из них равна своему значению в данный момент  $t$ . Такое допущение относительно периодической слагающей делают, когда источником является генератор конечной мощности; для условий же §?? постоянство амплитуды соблюдается.

Сказанное иллюстрирует рис. 3.5, где для общности принято, что амплитуда периодической слагающей тока изменяется. Для заданного момента  $t$  амплитуду этой слагающей определяют по соответствующей огибающей (см. пунктирные линии); при этом действующее значение рассматриваемой слагающей в этот момент находят как

$$I_{nt} = I_{nmt} / \sqrt{2}. \quad (3.10)$$

Соответственно действующее значение апериодической слагающей за один период при принятом допущении равно ее мгновенному значению в момент, находящийся посередине данного периода (рис. 3.5) т. е.

$$I_{at} = i_{at}. \quad (3.11)$$

Действующее значение полного тока в тот же момент будет:

$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2}, \quad (3.12)$$

т. е. оно определяется знакомым выражением для действующего значения несинусоидального тока.

Точность определения по (3.12) вполне удовлетворяет требованиям практики.

Наибольшее действующее значение полного тока короткого замыкания  $I_y$  имеет место за первый период переходного процесса. При условии, когда  $i_a/0 = I_{nm}$ , его можно определить по (3.12), придав последнему следующий вид:

$$I_y = \sqrt{I_n^2 + [(k_y - 1)\sqrt{2}I_n]^2} = I_n \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}, \quad (3.13)$$

где  $k_y$  — ударный коэффициент.

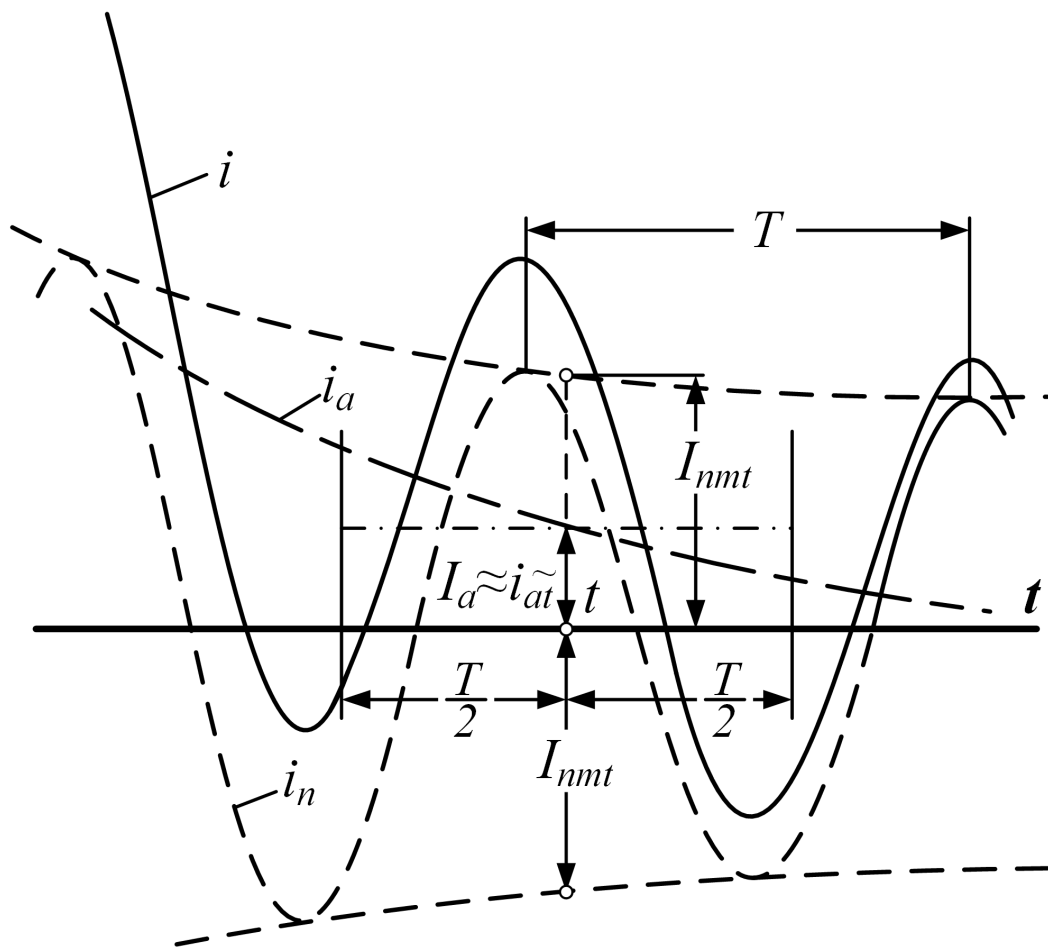


Рис. 3.5: К определению действующего значения тока в переходном процессе.

Согласно указанным выше пределам изменений  $k_y$  величина отношения  $I_y/I_n$  находится в пределах

$$1 < \frac{I_y}{I_n} < \sqrt{3}.$$

На рис. 3.6 показаны кривые изменения отношений  $I - y/I_n$  и  $i_y/I_y$  в функции  $k_y$ . Как видно, отношение  $i_y/I_y$  изменяется в сравнительно узких пределах и его максимум ( $\sqrt{3}$ ) наступает при  $k_y = 1,5$ .

### 3.4 Приближенное решение

Представим выражение для периодической слагающей тока короткого замыкания в несколько ином виде, т. е.



где  $I_{pm}(r_k=0) = U_m/x_k$  — значение той же слагающей при  $r_k = 0$  и  $c = r_k/x_k$ .

Рис. 3.6 Кривые изменения отношения периодической слагающей тока, вызванное пренебрежением (кривая 1) характером (кривая 2) в зависимости от ударного коэффициента  $k_y$ .

$$\frac{I_{pm}(r_k=0)}{I_{pm}} = \sqrt{1+c^2}. \quad (3.14)$$

Если считать, что это превышение не должно быть более 5%, то из (3.14) легко установить, что оно будет соблюдаться при

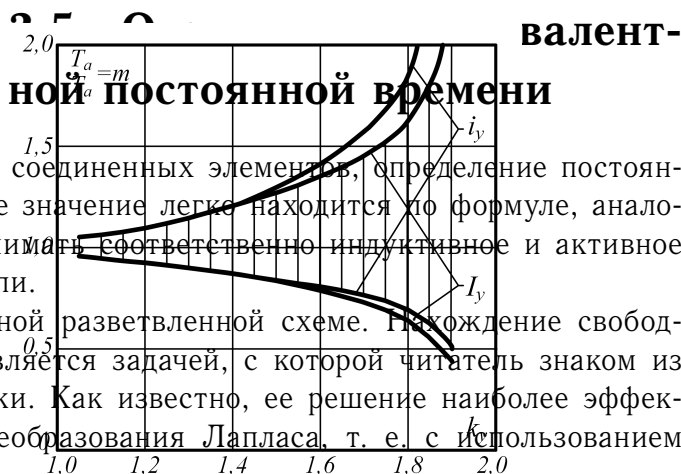
$$c \leq \sqrt{1,05^2 - 1} \approx 1/3,$$

т. е. определение  $I_n$  можно производить без учета  $r_k$ , когда  $r_k \leq x_k/3$ . При этом, конечно, фаза данной слагающей тока получается искаженной:  $\varphi_k = 90^\circ$  вместо  $\varphi_k = 72^\circ$  при  $r_k = x_k/3$ . Что касается аperiodической слагающей, то при  $r_k = 0$  ее затухание вообще отсутствует и  $k_y = 2$ , в то время как при  $r_k = x_k/3$  имеем  $k_y = 1,37$ ; преувеличение ударного тока уже составляет 53%, а электродинамического эффекта — в  $1,53^2 \approx 2,5$  раза. Аналогично нетрудно установить, что при тех же условиях преувеличение в наибольшем действующем значении полного тока короткого замыкания достигает 61%.

Этот элементарный подсчет наглядно иллюстрирует, насколько одно и то же допущение может привести к резко отличающимся погрешностям в определении отдельных величин. Очевидно, достаточно правильная оценка аperiodической слагающей и полных величин тока, в которых ее участие существенно, может быть получена при непременном учете активного сопротивления цепи. Последний можно сделать приближенно и даже в неявной форме путем использования некоторой средней величины постоянной времени  $T_a$  и соответствующего ей значения ударного коэффициента. Такое различие в принимаемых допущениях при практической оценке отдельных слагающих тока является одним из примеров той условности и как бы несогласованности, о чем отмечалось в §??.

Используя (3.7) и (3.13), можно установить допустимые отклонения приближенной величины постоянной времени  $T_a$ , при которых ошибки в определении ударного тока и наибольшего действующего значения тока короткого замыкания не выходили бы за пределы  $\pm 5\%$ . Результаты такого подсчета приведены на рис. 3-7, где допускаемые по данному

условию пределы  $m = T'_a/T_a$  ограничены соответствующими кривыми в зависимости от  $k_y$ . При  $k_y = 1,8$  постоянная времени  $T_a = 0,045$  сек; если приближенно вычисленная  $T'_a$  согласно данным рис. 3-7 находится в пределах  $T'_a = (0,65 \div 1,83)$   $T_a = 0,029 \div 0,082$  сек, то ошибка в ударном токе не превысит  $\pm 5\%$ .



Для цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов, определение постоянной времени  $T_a$  не представляет труда. Ее значение легко находится по формуле, аналогичной (3.3), где под  $x_1$  и  $r_1$  следует понимать соответственно индуктивное и активное сопротивления всей короткозамкнутой цепи.

Иное положение имеет место в сложной разветвленной схеме. Нахождение свободного тока в любой ветви такой схемы является задачей, с которой читатель знаком из курса теоретических основ электротехники. Как известно, ее решение наиболее эффективно достигается путем применения преобразования Лапласа, т. е. с использованием операторного метода.

При отсутствии кратных корней характеристического уравнения  $z(p) = 0$  для свободного тока произвольной ветви в соответствии с известной формулой разложения имеем:

$$\sum_{k=1}^n \frac{F_k(p_k)}{p_k F'_2(p_k)} e^{p_k t} = I_{a1} e^{p_1 t} + I_{a2} e^{p_2 t} + \dots + I_{an} e^{p_n t}, \quad (3.15)$$

где каждое из слагаемых представляет частный свободный ток.

Когда в схеме нет емкости, все корни характеристического уравнения являются вещественными отрицательными величинами и для них можно написать:

$$p_1 = -1/T_{a1}; \quad p_2 = -1/T_{a2}; \quad \dots; \quad p_n = -1/T_{an},$$

где  $T_{a1}, T_{a2}, \dots, T_{an}$  — постоянные времени свободных токов.

Начальные значения частных свободных токов  $I_{a1}, I_{a2}, \dots, I_{an}$ , равно как и их постоянные времена, являются функциями параметров всех элементов схемы.

Такой общий строгий путь решения уже для маломальски сложной схемы требует большой вычислительной работы. Достаточно напомнить, что каждая параллельная ветвь с  $r$  и  $L$  увеличивает на один порядок степень характеристического уравнения. Поэтому для практических расчетов довольствуются более простым, приближенным решением, одно из которых состоит в замене (3.15) одной экспонентой:

$$I_{at} = I_{a/0} e^{-t/T_{a.э}}, \quad (3.16)$$

где  $T_{a.э}$  — некоторая эквивалентная постоянная времени, определяемая как

$$T_{a.э} = \frac{x_{\Sigma}}{\omega r_{\Sigma}}, \quad (3.17)$$

причем здесь  $x_{\Sigma}$  — суммарное индуктивное сопротивление схемы, найденное при отсутствии всех активных сопротивлений ( $r = 0$ ), и  $r_{\Sigma}$  — суммарное активное сопротивление схемы при отсутствии всех индуктивных сопротивлений ( $x_{\Sigma} = 0$ ). Такой искусственный прием определения  $T_{a.э}$  сильно упрощает решение<sup>4</sup>. При нем приблизительно

<sup>4</sup>Отметим, что такой упрощенный подсчет аperiodической слагающей (вернее,  $T_{a.э}$ ), в частности, принят в последнем американском стандарте на выключатели высокого напряжения.

соблюдается эквивалентность количества электричества в действительных и заменяемых условиях.

Что касается начального значения  $I_{a/0/}$  в (3.16), то его легко определить по начальным условиям для данной ветви, поскольку начальное значение периодической слагающей тока нетрудно подсчитать, а предшествующий ток, как правило, известен.

При более грубых расчетах обычно не прибегают к подсчету  $T_{a.э}$ , а принимают для нее некоторое среднее значение в соответствии с принятым для данных условий ударным коэффициентом. Так, при  $k_y = 1,8$  значение  $T_a = 0,045$  сек, которое считают одним и тем же для всех ветвей схемы.

*Пример ??-1.* Для схемы, показанной в верхней части **рис. 3-8**, найти затухание свободных токов и эквивалентную постоянную времени. Сопротивления элементов выражены в операторной форме и заданы в относительных единицах при некоторых базисных условиях.

Определим результирующее операторное сопротивление схемы:

$$z(p) = \frac{(1 + 15p)(1 + 3p)}{(1 + 15p) + (1 + 3p)} + (1 + 2p) = \frac{81p^2 + 40p + 3}{2 + 18p}.$$

Из  $z(p) = 0$ , т. е. их уравнения  $81p^2 + 40p + 3 = 0$  находим корни:

$$p_{1,2} = \frac{-40 \pm \sqrt{40^2 - 4 \cdot 81 \cdot 3}}{2 \cdot 81},$$

т. е.  $p_1 = -0,091$ ; соответственно  $T_{*a1} = \frac{-1}{-0,091} = 11$ ;  $p_2 = -0,405$ ; соответственно  $T_{*a2} = \frac{-1}{-0,405} = 2,47$ .

В именованных единицах эти постоянные времени будут:

$$T_{*a1} = \frac{11}{314} = 0,035 \text{ сек} \quad T_{*a2} = \frac{2,47}{314} = 0,008 \text{ сек}.$$

Относительная величина свободного тока в общей ветви схемы пропорциональна результирующей операторной проводимости

$$I_a(p) = Y(p) = 1/z(p) = \frac{2 + 18p}{81p^2 + 40p + 3} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}.$$

Используя (3.14), перейдем от изображения к оригиналу:

$$I_{at} = \frac{2 + 18(-0,091)}{(-0,091)2 \cdot 81(-0,091) + 40} e^{-0,001t} + \frac{2 + 18(-0,405)}{(-0,405)2 \cdot 81(-0,405) + 40} e^{(-0,405t)} =$$

$$-0,16e^{-0,001t} - 0,51e^{0,405t}.$$

Начальные значения частных свободных токов в долях от начального значения свободного тока в данной цепи составляют:

$$I_{a1|0|} = \frac{0,16}{0,16 + 0,51} = 0,24 \quad \text{и} \quad I_{a2|0|} = \frac{0,51}{0,16 + 0,51} = 0,76.$$

Изменения этих токов и их суммы во времени показаны на рис. 3.8, здесь время выражено в относительных единицах.

Для определения эквивалентной постоянной времени находим  $x_{\Sigma}$ , полагая в схеме рис. 3.8  $r = 0$ :

$$x_{\Sigma} = (15//3) + 2 = 4,5;$$

аналогично при  $x = 0$

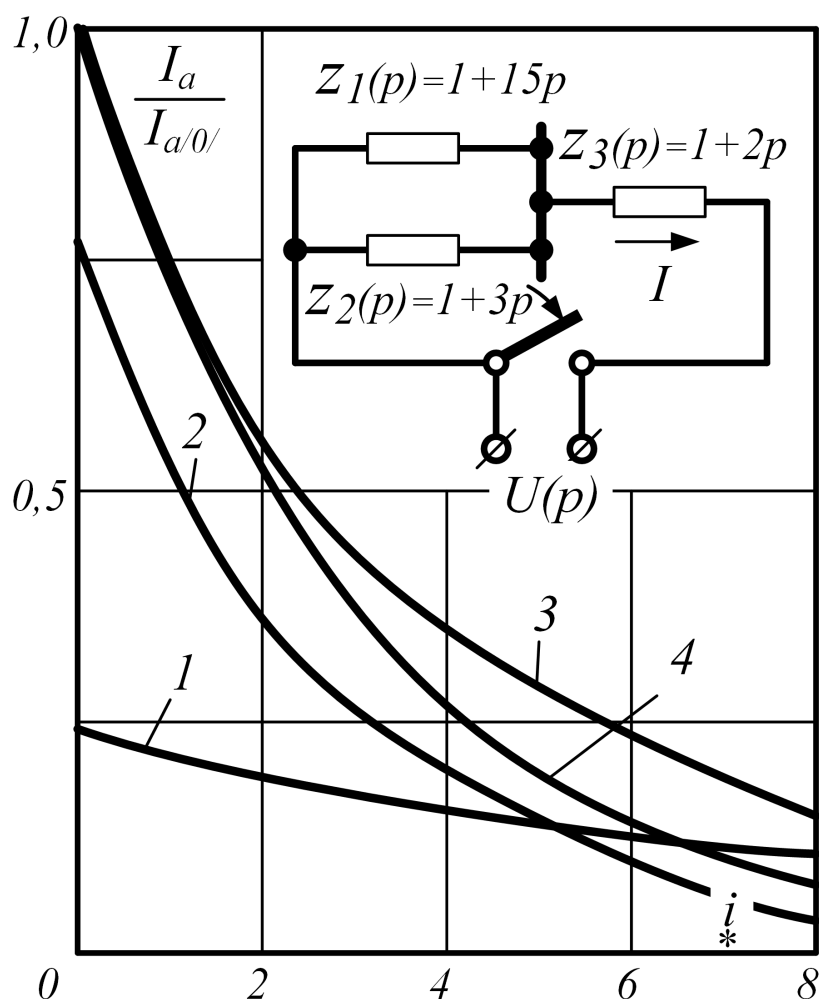


Рис. 3.8: К примеру ??-1. Исходная схема и кривые изменения во времени отношений токов. 1 —  $I_{a1}/I_{a/0/}$ ; 2 —  $I_{a2}/I_{a/0/}$ ; 3 —  $(I_{a1} + I_{a2})/I_{a/0/}$ ; 4 —  $I_a/I_{a/0/} = e^{-t/T_{a.э}}$ .

$$r_{\Sigma} = \frac{1}{2} + 1 = 1,5.$$

Следовательно по (3.17) находим:

$$T_{a.э} = \frac{4,5}{1,5} = 3 \quad T_{a.э} = \frac{3}{314} = 0,01 \text{ сек.}$$

Экспонента этой постоянной времени представлена на рис. 3.8 кривой 4. Ее расхождение с истинной кривой  $\frac{I_{a1}+I_{a2}}{I_{a/0/}}$  при  $t_* = 314 \times 0,01 = 3,14$  (т. е. в момент наступления максимального мгновенного значения полного тока в этой цепи) составляет примерно -10 %.

### 3.6 Графическое решение

Когда приложенное к цепи с  $r$  и  $L$  напряжение выражено аналитической функцией времени, решение дифференциального уравнения (3.1а) можно выполнить, применяя, в частности, известный интеграл Дюамеля. Если же это напряжение и задано какой-либо кривой, которую нельзя представить достаточно близкой аналитической функцией, то решение

уравнения (3.1а) можно провести приближенно с помощью графического построения, основанного на следующем.

Заменим в 3.1а) производную  $di/dt$  отношением конечных разностей  $\Delta i/\Delta t$ ; после небольших преобразований теперь имеем:

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{i - \frac{u}{r}}{T_a} = -\frac{i_{св}}{T_a} \quad (3.18)$$

т. е. скорость изменения тока в пределах интервала  $\Delta t$  пропорциональна свободному току в начале рассматриваемого интервала.

Для построения искомой кривой изменения тока во времени нужно на расстоянии  $T_a$  от начала координат (рис. 3.9) сначала нанести кривую изменения принужденного тока  $i_b = u/r$ . Затем следует разбить ось абсцисс и кривую  $i_b = f(t)$  на интервалы  $\Delta t$ . Для повышения точности построения целесообразно для каждого интервала использовать значение тока не в начале, а в середине интервала (точки  $1', 2', 3'$ , и т. д.). Таким образом, искомое значение тока в конце первого интервала (точка  $1'$ ) определяется пересечением соответствующей ординаты с прямой  $01'$ , а в конце второго интервала — пересечением соответствующей ординаты с прямой  $12'$  и т. д.

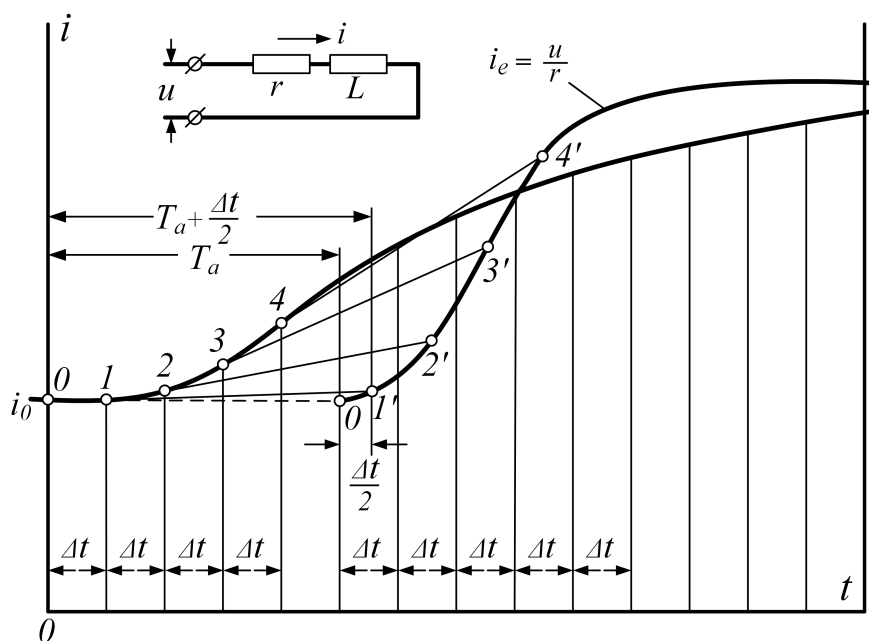


Рис. 3.9: Графический способ нахождения кривой изменения тока в цепи  $r, L$ , при произвольном изменении напряжения источника.

В зависимости от характера кривой изменения принужденной составляющей и требуемой точности решения продолжительность интервала обычно принимают в пределах  $\Delta t = 0,05 \div 0,2$  сек.

Этот способ графического решения дифференциального уравнения вида (3.1а) иногда используют даже в тех случаях, когда происходящее возмущение в контуре можно представить в математической форме.





## Глава 4

# Переходный процесс в неподвижных магнитосвязанных цепях

### 4.1 Общие замечания

Протекание электромагнитного переходного процесса в магнитосвязанных цепях имеет некоторые характерные особенности. Рекомендуется обратить особое внимание на основные закономерности и соотношения, рассматриваемые в настоящей главе; они в значительной мере облегчат понимание более сложных явлений, которые исследуются в дальнейшем применительно к вращающимся электрическим машинам.

В качестве основной предпосылки в соответствии с ранее принятыми допущениями считаем, что между токами и напряжениями рассматриваемых цепей сохраняется линейная зависимость и, следовательно, они могут быть связаны линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Для силовых трансформаторов и автотрансформаторов в условиях короткого замыкания (или значительных перегрузок) это допущение практически выполняется, поскольку основные магнитные потоки и обусловленное ими насыщение магнитопроводов при этом становится меньше.

Иное положение имеет место в измерительных трансформаторах тока при протекании по их первичным обмоткам больших токов короткого замыкания (или перегрузки). Здесь ток во вторичной обмотке сильно зависит от насыщения магнитопровода. Последний вопрос представляет предмет специального исследования.

Указанное допущение также не пригодно, когда рассматривается переходный процесс при включении силовых трансформаторов и автотрансформаторов и при внезапном сбросе их нагрузки. Правильное представление о протекании такого переходного процесса можно получить только при учете изменения насыщения их магнитопроводов (см. § 4-6).

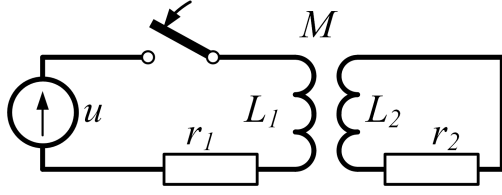
Характер изменения свободных токов, как известно, определяется параметрами элементов рассматриваемой схемы и соотношениями между ними. Поэтому полученные ниже закономерности изменения свободных токов справедливы при любых э. д. с. источников питания.

От величины э. д. с., естественно, зависят начальные значения свободных токов.

### 4.2 Основные уравнения и соотношения

Рассмотрим переходный процесс при включении на некоторое напряжение  $u(t)$  контура с  $L_1$  и  $r_1$  связанного взаимной индуктивностью  $M$  с другим контуром, индуктивность и активное сопротивление которого  $L_2$  и  $r_2$ . По существу это является процессом включения воздушного трансформатора с закороченной вторичной обмоткой (рис. 4-1). Условимся,

что все параметры и величины второго контура приведены к стороне первого контура.



Для каждого контура соответственно имеем:

постоянные времени

$$T_{10} = \frac{L_1}{r_1} \text{ сек.}$$

и

$$T_{20} = \frac{L_2}{r_2} \text{ сек.}$$

Рис. 4.1: Простейшая цепь с магнитной связью.

(индекс 0 у постоянной времени указывает, что она определена при всех разомкнутых контурах, с которыми данный контур имеет магнитную связь);

коэффициенты рассеяния

$$\sigma_1 = \frac{L_1 - M}{L_1}$$

и

$$\sigma_2 = \frac{L_2 - M}{L_1}.$$

Коэффициент магнитной связи между контурами

$$k = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

и общий коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - k^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_1 \sigma_2; \quad (4.1)$$

при малых значениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  можно принимать

$$\sigma \approx \sigma_1 + \sigma_2 \quad (4.2)$$

Считая, что при принятых положительных направлениях токов магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждой катушке совпадают, имеем:

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \\ 0 &= i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

в операторной форме (при нулевых начальных условиях)

$$\left. \begin{aligned} u(p) &= r_1 I_1(p) + L_1 p I_1(p) + M p I_2(p); \\ 0 &= r_2 I_2(p) + L_2 p I_2(p) + M p I_1(p). \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

Решение системы (4.4) легко получить простой подстановкой. Из второго уравнения имеем:

$$I_2(p) = -\frac{M p}{r_2 + L_2 p} I_1; \quad (4.5)$$

после подстановки (4.5) в первое уравнение (4.4) найдем:

$$I_1(p) = \frac{u(p)}{z_1(p)}, \quad (4.6)$$

где

$$\begin{aligned} z_1(p) &= r_1 + (L_1 - \frac{M^2 p}{r_2 + L_2 p})p = r_1 + \frac{1 + \sigma T_{20} p}{1 + T_{20} p} L_1 p = \\ &= \frac{\sigma T_{10} T_{20} p^2 + (T_{10} + T_{20})p + 1}{(1 + T_{20} p)} r_1 \end{aligned} \quad (4.7)$$

— операторное сопротивление первого контура с учетом магнитносвязанного с ним короткозамкнутого второго контура.

Из (4.7) следует, что влияние короткозамкнутого контура сказывается в снижении  $L_1$ , причем оно тем сильнее, чем меньше рассеяние и больше постоянная времени  $T_{20}$ . Напротив, в пределе, когда  $\sigma = 1$ , т. е. при отсутствии магнитной связи, индуктивность  $L_1$  неизменна.

Из характеристического уравнения  $z_1(p) = 0$  находим его корни:

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= \frac{-(T_{10} + T_{20}) \pm \sqrt{(T_{10} + T_{20})^2 - 4\sigma T_{10} T_{20}}}{2\sigma T_{10} T_{20}} = \\ &= -\frac{(T_{10} + T_{20})}{2\sigma T_{10} T_{20}} \times (1 \mp q), \end{aligned} \quad (4.8)$$

где

$$q = \sqrt{1 - \frac{4\sigma T_{10} T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2}}. \quad (4.9)$$

Поскольку всегда  $(T_{10} + T_{20})^2 > 4\sigma T_{10} T_{20}$ , оба корня являются действительными, меньшими нуля.

Следовательно, свободный ток каждого контура представляет собой сумму двух свободных токов, один из которых затухает по экспоненте с постоянной времени<sup>1</sup>

$$T' = -\frac{1}{p} = \frac{2}{(1 - q)} \frac{\sigma T_{10} T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \frac{1 + q}{2} (T_{10} + T_{20}), \quad (4.10)$$

а другой — с постоянной времени

$$T'' = -\frac{1}{p_2} = \frac{2}{(1 + q)} \frac{\sigma T_{10} T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \frac{1 - q}{2} (T_{10} + T_{20}), \quad (4.11)$$

отношение между которыми

$$\frac{T'}{T''} = \frac{1 + q}{1 - q}. \quad (4.12)$$

Как видно,  $T'$  всегда больше  $T''$ , причем различие между ними возрастает с уменьшением рассеяния. В пределе при  $\sigma = 0$  имеем:  $T' = T_{10} + T_{20}$  и  $T'' = 0$ .

При включении контура на постоянное напряжение  $U \doteq U(p) = U/p$  для изображения тока первого контура имеем:

$$I_1(p) = \frac{U}{p z_1(p)}$$

<sup>1</sup>Индексация постоянных времени умышленно принята отличной от обозначения рассматриваемых контуров, чтобы исключить ошибочное представление, что каждая из этих постоянных времени характеризуется параметрами якобы только одного из данных контуров.

Используя известную формулу разложения (или ее видоизменение, так называемую формулу включения) и произведя ряд преобразований, получим временную функцию тока этого контура:

$$i_1(t) = i_1 + i_1' + i_1'' = \frac{U}{r_1} - \frac{U(T_{10} - T'')}{r_1(T' - T'')}e^{-t/T'} - \frac{U(T_{10} - T'')}{r_1(T' - T'')}e^{-t/T''}, \quad (4.13)$$

где

$i_1$  - принужденный или установившийся ток;

$i_1'$  - медленно затухающий свободный ток;

$i_1''$  - быстро затухающий свободный ток.

Соотношение между начальными значениями этих свободных токов определяется постоянными времени:

$$\frac{i_1''}{i_1'} = \frac{T_{20} - T''}{T_{10} - T''}. \quad (4.14)$$

Аналогично находим выражение для тока во втором контуре:

$$i_2(t) = i_2' + i_2'' = -\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{(T' - T'')} (e^{-t/T'} - e^{-t/T''}), \quad (4.15)$$

из которого видно, что при включении контура на постоянное напряжение принужденный ток во втором контуре, естественно, отсутствует, а начальные значения свободных токов равны и взаимно противоположны:

$$i_2'' = -i_2'. \quad (4.16)$$

Их связь с одноименными свободными токами первого контура выражается соотношениями:

$$i_2' = \frac{M}{L_2} \frac{T_{20}}{(T_{10} - T'')} i_1'; \quad (4.17)$$

$$i_2'' = -\frac{M}{L_2} \frac{T_{20}}{(T_{20} - T'')} i_1''. \quad (4.18)$$

Для рассматриваемого переходного процесса на **рис. 4-2,а** приведены кривые изменения токов и их отдельных слагающих, причем откладываемое по оси абсцисс время выражено в долях от  $t_{10}$ . Ток  $i_1(t)$  стремится к своему принужденному значению, а ток  $i_2(t)$  сначала возрастает до своего максимума, а затем затухает, стремясь к нулю. Момент наступления максимума легко найти из уравнения  $di_2/dt = 0$ :

$$t_m = \frac{T' T''}{T' - T''} \ln \frac{T'}{T''}. \quad (4.19)$$

Подставив (4.19) в (4.15), получим:

$$i_{2m} = -\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{(T' - T'')} (e^{-t_m/T'} - e^{-t_m/T''}). \quad (4.20)$$

Для сопоставления на **рис. 4-2,б** показаны кривые изменения токов при закорачивании первого контура, после того как в нем наступил установившийся режим. В этом случае все величины свободных токов остаются такими же, как и при рассмотренном выше процессе включения, но их знаки меняются на обратные. При этом, разумеется, принужденные токи в обоих контурах отсутствуют.

По характеру кривых изменения токов  $i_1$  и  $i_2$  (рис 4-2) видно, что в начальной стадии переходного процесса изменение токов обуславливается главным образом быстро затухающими свободными токами, а в последующей практически только медленно затухающими свободными токами. Ток намагничивания, определяемый суммой токов ( $i_1 + i_2$ ), практически изменяется экспоненциально с постоянной времени  $T'$  так как сумма быстро затухающих токов ( $i_1'' + i_2'$ ) очень мала. Последняя равна нулю при  $\sigma = 0$ .

Медленно затухающие свободные токи практически связаны с изменением только общего магнитного потока или потока взаимоиנדукции между контурами, а быстро затухающие — с изменением только потоков рассеяния контуров.

Таким образом, магнитная связь между контурами вначале убыстряет переходный процесс, а затем, напротив, замедляет его. При постоянном коэффициенте рассеяния  $\sigma$  это проявляется тем интенсивнее, чем больше постоянная времени влияющего контура ( $T_{20}$ ). Это хорошо видно на рис 4-3, где приведены для нескольких значений  $T_{20}$  кривые изменения токов  $i_1$  и  $i_2$ . Кривые при  $T_{20} = 0$  соответствуют условию, при котором влияющий контур отсутствует (или разомкнут); соответственно при  $T_{20} = \infty$  — когда он является сверхпроводящим. В последнем случае наведенный свободный ток  $i_2$  стремится к своему наибольшему значению, а затем остается неизменным, поскольку потерь в этом контуре нет.

### 4.3 Влияние рассеяния

Выясним теперь, как влияет рассеяние на соотношения между постоянными времени затухания свободных токов, а также между начальными значениями этих токов. Для этого установим вначале дополнительные соотношения, которые вытекают из известных свойств корней квадратного уравнения<sup>2</sup>. Из них имеем:

$$p_1 + p_2 = -\left(\frac{1}{T'} + \frac{1}{T''}\right) = -\frac{T_{10} + T_{20}}{\sigma T_{10} T_{20}}, \quad (4.21)$$

или

$$\frac{T' + T''}{T' T''} = \frac{T_{10} + T_{20}}{\sigma T_{10} T_{20}};$$

помимо того,

$$p_1 p_2 = \frac{1}{T' T''} = \frac{1}{\sigma T_{10} T_{20}},$$

т. е.

$$T' T'' = \sigma T_{10} T_{20} \quad (4.21a)$$

или

$$\sigma = \frac{T' T''}{T_{10} T_{20}}. \quad (4.21b)$$

Используя (4.21a), из (4.21b) находим весьма важное соотношение:

$$T' + T'' = T_{10} + T_{20}. \quad (4.22)$$

На рис. 4-4a сплошные кривые иллюстрируют для значений  $T_{20}/T_{10}$  изменение отношений  $T'/(T_{10} + T_{20})$  и  $T''/(T_{10} + T_{20})$  в зависимости от коэффициента рассеяния. Каждая

<sup>2</sup>Корни уравнения  $ax^2 + bx + c = 0$  связаны между собой соотношениями:  $x_1 + x_2 = -\frac{b}{a}$  и  $x_1 x_2 = \frac{c}{a}$ .

кривая характеризует оба отношения, но для  $T'/(T_{10} + T_{20})$  шкала расположена слева, а для  $T''/(T_{10} + T_{20})$  — справа. Как видно, влияние рассеяния сильнее сказывается при симметричных контурах, т. е. когда их постоянные времени одинаковы ( $T_{20}/T_{10} = 1$ ).

Аналогично приведенные на рис. 4-4,б кривые иллюстрируют для ряда значений  $T_{20}/T_{10}$  изменение отношений начальных свободных токов  $i'_{1|0|}/i'_{1|0|}$  и в функции  $\sigma$ , причем, как и на рис. 4-4,а, использовано двустороннее расположение шкал. При  $T_{20}/T_{10} > 1$  рост  $\sigma$  приводит к снижению  $i'_{1|0|}$  и, наоборот, при  $T_{20}/T_{10} < 1$  — к увеличению  $i'_{1|0|}$ . Соответственно для  $i''_{1|0|}$  получаются обратные соотношения. Достаточно заметное влияние изменения  $\sigma$  сказывается лишь при относительно больших значениях  $\sigma$  (свыше 0,5). При симметричных контурах  $i'_{1|0|} = i''_{1|0|}$ , причем это равенство сохраняется вне зависимости от  $\sigma$ .

*Пример 4-1.* Для схемы на рис. 4-1 известны  $\sigma = 0,21$  и  $T_{20}/T_{10} = 1,22$ . Переходный процесс вызывается включением первого контура на постоянное напряжение. Построить кривые изменения токов в обоих контурах, выразив токи в долях принужденного тока первого контура, а время — в долях от  $T_{10}$ .

По (4.9) находим:

$$q = \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,21 \cdot 1,22}{(1 + 1,22)^2}} = 0,89$$

и по (4.10)

$$\frac{T'}{T_{10}} = \frac{2}{1 - 0,89} \frac{0,21 \cdot 1,22}{(1 + 1,22)} = 2,1.$$

По выражению (4.11) или, проще, из (4.22) имеем:

$$\frac{T''}{T_{10}} = 1 + 1,22 - 2,1 = 0,12.$$

В соответствии с (4.14)

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} = \frac{1,22 - 0,12}{1 - 0,12} = 1,25.$$

При заданных начальных условиях  $i_{|0|} = -i_1$ , поэтому свободные токи первого контура будут:

$$\frac{i'_{1|0|}}{i_1} = \frac{-1}{1 + 1,25} = -0,445;$$

$$\frac{i''_{1|0|}}{i_1} = \frac{-1,25}{1 + 1,25} = -0,555.$$

Уравнение для тока в первом контуре будет:

$$\frac{i_1(t)}{i_1} = 1 - 0,445e^{-\frac{t'}{2,1}} - 0,555e^{-\frac{t'}{0,12}},$$

где

$$t' = t/T_{10}$$

Примем, что коэффициент рассеяния  $\sigma = 0,21$  состоит из  $\sigma_1 = 0,11$  и  $\sigma_2 = 0,11$ . Тогда  $M/L_2 = 1 - 0,1 = 0,9$  и с учетом полученных значений  $i'_{1|0|}/i_1$  и  $i''_{1|0|}/i_1$  по (4.17) и (4.18) имеем:

$$\frac{i'_{2|0|}}{i_1} - \frac{i''_{2|0|}}{i_1} = 0,555.$$

По (4.15) уравнение для тока во втором контуре будет:

$$\frac{i_2(t)}{i_1} = -0,555(e^{-\frac{t'}{2,1}} - e^{-\frac{t'}{0,12}}).$$

По (4.19) и (4.20) находим, что максимум тока во втором контуре наступает при

$$t'_m = \frac{t_m}{t_{10}} = \frac{2,1 \cdot 0,12}{2,1 - 0,12} \ln \frac{2,1}{0,12} = 0,363$$

и составляет

$$\frac{i_{2m}}{i_1} = -0,44.$$

Представленные на **рис. 4-2,а** кривые построены по найденным здесь уравнениям.

## 4.4 Приближенное решение

При сильной магнитной связи между контурами, т. е. при малом значении коэффициента рассеяния  $\sigma$  математические выкладки и соотношения для рассматриваемого переходного процесса могут быть значительно упрощены, если ввести некоторые дополнительные допущения. Получаемые при этом результаты по своей точности обычно удовлетворяют требованиям практики.

Сущность такого приближенного решения заключается в следующем. При малом значении  $\sigma$  можно пренебречь вычитаемым под радикалом в (4.9); это приводит к соотношениям:

$$T'' \approx \frac{\sigma T_{10} T_{20}}{T_{10} + T_{20}} \quad (4.23)$$

и

$$T' \approx T_{10} + T_{20}. \quad (4.24)$$

Однако, поскольку приближенное значение  $T''$  по (4.23) уже найдено, величину  $T'$  можно определить несколько точнее, используя (4.22), т. е.

$$T' = T_{10} + T_{20} - T''. \quad (4.25)$$

Таким образом, приближенные значения  $T'$  и  $T''$  пропорциональны  $\sigma$ ; на **рис. 4-4,а** это иллюстрируют прямые, проведенные пунктиром. Ошибка в приближенной оценке  $T'$  и  $T''$  увеличивается с ростом  $\sigma$  и уменьшением несимметрии контуров. При этом приближенные значения  $T'$  весьма преувеличены, а  $T''$ , напротив, преуменьшены. При  $\sigma \leq 0,4$  эти погрешности очень малы и ими можно пренебрегать.

Обратимся теперь к оценке приближенных соотношений между начальными значениями свободных токов. Постоянная времени  $T''$  при малых  $\sigma$  всегда много меньше  $T_{10}$  и  $T_{20}$ . Если в (4.14) ею пренебречь, то

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} \approx \frac{T_{20}}{T_{10}} \quad (4.26)$$

и из (4.17) и (4.18) с учетом (4.26)

$$i'_{2|0|} \approx \frac{M}{L_2} \frac{T_{20}}{T_{10}} i'_{1|0|} = \frac{M}{L_2} i''_{1|0|} \quad (4.27)$$

и

$$i''_{2|0|} = -\frac{M}{L_2} i''_{1|0|} = -i'_{2|0|}. \quad (4.28)$$

При  $T_{20} > T_{10}$  приближенное решение дает преуменьшение тока  $i''_{1|0|}$  и, следовательно, преувеличение тока  $i'_{1|0|}$ . При  $T_{20} < T_{10}$  имеет место обратная картина. Что касается погрешностей в токах  $i'_{2|0|}$  и  $i''_{2|0|}$  при приближенном определении, то они всегда получают отрицательными (т. е. токи преуменьшены). Однако при достаточно малых  $\sigma$  все эти погрешности вполне допустимы.

Следует особо подчеркнуть, что при отсутствии рассеяния ( $\sigma = 0$ ) возможно изменение токов в контурах скачком, причем это не противоречит неизменности результирующего потокосцепления, так как последнее определяется намагничивающим током, величина которого не претерпевает внезапных изменений. Рассеяние сглаживает изменение токов в контурах при внезапном изменении режима, при этом чем оно больше, тем плавнее происходит переход от одного режима к другому.

*Пример 4-2.* Для условий примера 4-1 найти приближенные значения постоянных времени и начальных свободных токов.

По (4.23) имеем:

$$\frac{T''}{T_{10}} = \frac{0,21 \cdot 1,22}{1 + 1,22} = 0,115 \text{ (вместо } 0,12)$$

и по (4.25)

$$\frac{T'}{T_{10}} = 1 + 1,22 - 0,115 = 2,105 \text{ (вместо } 2,1).$$

Соотношения между начальными значениями свободных токов по (4.26)

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} = \frac{T_{20}}{T_{10}} = 1,22 \text{ (вместо } 1,25).$$

Начальные свободные токи в долях принужденного тока первого контура равны:

$$\frac{i'_{1|0|}}{i_1} = \frac{-i'_{1|0|}}{i'_{1|0|} + i''_{1|0|}} = \frac{-1}{1 + 1,22} = -0,45 \text{ (вместо } -0,445)$$

и

$$\frac{i''_{1|0|}}{i_1} = \frac{-i''_{1|0|}}{i'_{1|0|} + i''_{1|0|}} = \frac{-1,22}{1 + 1,22} = -0,55 \text{ (вместо } -0,555)$$

соответственно в другом контуре

$$\frac{i'_{2|0|}}{i_1} = -\frac{i''_{2|0|}}{i_1} = -0,55 \text{ (вместо } -0,555)$$

Максимум тока  $i_2$  наступает при  $t_m/T_{10} = 0,355$  (вместо 0,363) и его величина составляет:

$$\frac{i_{2m}}{i_1} = -0,441,$$

т. е. практически та же, что и при точном решении.



## 4.5 Внезапное короткое замыкание трансформатора

Переходный процесс при внезапном коротком замыкании за трансформатором при отсутствии насыщения его магнитопровода, вообще говоря, идентичен рассмотренному в § ??, с той лишь разницей, что здесь включение производится не на постоянное, а на синусоидальное напряжение. Полученные выше выражения для постоянных времени затухания свободных токов, конечно, полностью справедливы и в данном случае, причем, поскольку в трансформаторах потоки рассеяния ничтожно малы по сравнению с общим потоком взаимоиндукции, применение приближенных выражений (4.23) и (4.24) для оценки  $T''$  и  $T'$  практически не вносит никакой погрешности.

Применяя к схеме рис. 4-5,а формулу включения контура на синусоидальное напряжение, можно найти общие выражения для токов в цепи каждой обмотки трансформатора.

В схеме замещения двухобмоточного трансформатора (рис 4-5, б) обычно  $r_1 \approx r_2^{\circ}$ , и  $x_{\sigma 1} = x_{\sigma 1}^{\circ}$ , поэтому  $T_{10} \approx T_{20}$ . При этом условии соотношение между начальными свободными токами в обмотке с параметрами  $r_1, L_1$ , получается следующим:

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} = \frac{(1 + j\omega^2 T'^2)T''}{(1 + j\omega^2 T''^2)T'}; \quad (4.29)$$

его можно привести к еще более простому виду, если пренебречь в числителе и знаменателе весьма малыми действительными частями по сравнению с мнимыми:

$$\frac{i''_{1|0|}}{i'_{1|0|}} = \frac{(1 + j\omega^2 T'^2)T''}{(1 + j\omega^2 T''^2)T'}; \quad (4.30)$$



## Глава 5

# Установившийся режим короткого замыкания

### 5.1 Общие замечания

### 5.2 Основные характеристики и параметры

### 5.3 Приведение цепи ротора к статору

### 5.4 Влияние и учет нагрузки

### 5.5 Расчет при отсутствии автоматического регулирования возбуждения

### 5.6 Влияние автоматического регулирования возбуждения

Снижение напряжения, вызванное коротким замыканием, приводит в действие АРВ генераторов, и их возбуждение соответственно возрастает. Поэтому можно заранее предвидеть, что токи и напряжения при этих условиях всегда больше, чем при отсутствии АРВ. Степень такого увеличения зависит от удаленности короткого замыкания и параметров самих генераторов.

В самом деле, если при относительно удаленном коротком замыкании для восстановления напряжения генератора до нормального достаточно лишь немного увеличить возбуждение, то по мере уменьшения удаленности для этого, очевидно, требуется все большее возбуждение. Однако рост последнего у генератора ограничен известным пределом  $I_{fпр}$ .

Следовательно, для каждого генератора можно установить наименьшую величину внешней реактивности, при коротком замыкании за которой генератор при предельном возбуждении обеспечивает нормальное напряжение на своих выводах. Таковую реактивность назовем критической реактивностью  $x_{кр}$ , а связанный с ней очевидным равенством ток

$$I_{кр} = \frac{U_H}{x_{кр}} \quad (5.1)$$

— критическим током.

Если внешняя реактивность меньше критической, то, несмотря на работу генератора с предельным возбуждением, его напряжение все равно остается ниже нормального. Когда же внешняя реактивность больше критической, то напряжение генератора достигает нормального значения при возбуждении, меньшем предельного.

Таким образом, при коротком замыкании генератор с АРВ в зависимости от внешней реактивности может работать только в одном из двух режимов – предельного возбуждения или нормального напряжения. Лишь в частном случае, когда  $x_{\text{вн}} = x_{\text{кр}}$ , оба режима существуют одновременно. Критерием для оценки возможности того или иного режима служит критическая реактивность, величина которой может быть определена по (5-14), где следует положить  $E_q = E_{q\text{пр}}$ , т. е.

## 5.7 Расчет при наличии автоматического регулирования возбуждения

В схеме с несколькими генераторами, ток от которых поступает по общим для них ветвям, понятие внешней реактивности по отношению к каждому из них уже теряет смысл. Поэтому здесь нельзя непосредственно использовать установленный в предыдущем параграфе критерий для однозначного определения возможного режима работы каждого генератора при рассматриваемом коротком замыкании. В данном случае расчет приходится вести путем последовательного приближения, задаваясь для генераторов с АРВ в зависимости от положения каждого из них относительно места короткого замыкания либо режимом предельного возбуждения (т. е. вводя такой генератор в схему своими  $E_{q\text{пр}}$  и  $x_d$ ), либо режимом нормального напряжения (т. е. принимая для такого генератора  $E = U_n$  и  $x = 0$ ) и делая затем проверку выбранных режимов. Последняя заключается в сопоставлении найденных для этих генераторов токов с их критическими токами. Для режима предельного возбуждения должно быть  $I \geq I_{\text{кр}}$  (или, иначе,  $U \leq U_n$ ), а для режима нормального напряжения  $I \leq I_{\text{кр}}$ .

Если в результате проверки оказалось, что режимы некоторых генераторов выбраны неверно, то после их замены нужно сделать повторный расчет с последующей проверкой. При использовании расчетной модели такие пробы выполняются очень быстро. Однако и при аналитическом расчете в большинстве случаев удастся с первого раза правильно выбрать режимы генераторов с АРВ. Для этого нужно внимательно проанализировать условия работы отдельных генераторов при рассматриваемом коротком замыкании. В первую очередь нужно установить возможный режим ближайшего к месту короткого замыкания генератора, и если оказывается, что для него должен быть принят режим предельного возбуждения, то следует перейти к оценке возможных режимов других генераторов (или станций), рассматривая их поочередно в порядке увеличения их удаленности. Как только выявлен генератор (или станция), находящийся в режиме нормального напряжения, все приключенные к нему элементы, которые не образуют пути для тока к месту короткого, могут быть отброшены. Это может существенно упростить схему.

Нагрузки увеличивают проводимость приключенной к генератору цепи и, как показано в примере 5-4, могут влиять на режим его работы в условиях короткого замыкания. Это обстоятельство нужно учитывать при оценке возможного режима генераторов с АРВ.

Генераторы без АРВ вводят в схему, как обычно, своими реактивностями  $x_d$  и э. д. с.  $E_{q\text{пр}}$  которые у них были в предшествующем режиме. Наличие таких генераторов, вообще говоря, также может повлиять на режим работы генераторов с АРВ.

Все высказанные соображения наглядно иллюстрированы в приводимом ниже конкретном примере.

## Глава 6

# Начальный момент внезапного нарушения режима

### 6.1 Общие замечания

Прежде чем перейти к знакомству с общими уравнениями электромагнитного переходного процесса синхронной машины, рассмотрим сначала начальный момент такого процесса. Разумеется, все величины в начальный момент внезапного нарушения режима можно получить из упомянутых уравнений как их частное решение для  $t = 0$ . Более того, поскольку индуктивности цепей исключают внезапное изменение тока, то значение последнего в начальный момент переходного процесса, вообще говоря, является известным: оно сохраняется таким, что и в конце заданного предшествующего режима. Однако при изменившихся условиях этот ток состоит уже из новых слагающих, которые возникают в данном переходном процессе.

Поскольку поставленная задача ограничена рассмотрением лишь начального момента, вращение ротора и обусловленное этим изменение индуктивностей машины, очевидно, не играют никакой роли. Другими словами, в данном случае машину можно рассматривать как трансформатор.

Исследование начального момента переходного процесса проще и нагляднее вести на основе принципа сохранения первоначального потокосцепления. В самом деле, коль скоро магнитный поток, сцепленный с ротором, в момент внезапного нарушения режима сохраняется неизменным, то соответствующая ему э. д. с., наведенная в статоре, в тот же момент также остается неизменной. Следовательно, для синхронной машины условия в начальный момент переходного процесса аналогичны тем же условиям для трансформатора, питаемого источником синусоидального напряжения.

Таким образом, можно предвидеть, что при переходном процессе ток статора синхронной машины состоит из двух слагающих, а именно: *п е р и о д и ч е с к о й*, которая вызывается э. д. с., наводимой потоком ротора, и *а п е р и о д и ч е с к о й*, обусловленной изменением потока статора.

Часто рассматривают внезапное изменение тока, имея в виду изменение лишь одной из его слагающих. При этом другие слагающие обеспечивают в момент нарушения режима сохранение предшествующего мгновенного значения тока.

Во всех дальнейших выкладках (как в данной главе, так и в последующих главах) условимся считать:

1. продольную составляющую тока статора положительной, когда создаваемая ею н. с. совпадает по направлению с н. с. тока возбуждения;
2. поперечную составляющую тока статора положительной, когда создаваемая ею н. с.

отстает на  $90^\circ$  (электрических) от н. с. тока возбуждения; при наличии на роторе поперечного контура это же направление принимается положительным для его магнитной оси;

3. все величины ротора приведенными к статору, причем они, как и все величины статора, выражены в относительных единицах.

Установим теперь, какими э. д. с. и реактивностями можно характеризовать синхронную машину в начальный момент переходного процесса.

## 6.2 Переходные э. д. с. и реактивности синхронной машины

Обратимся к балансу магнитных потоков в продольной оси ротора синхронной машины при установившемся симметричном режиме ее работы с отстающим по фазе током (рис. 6-1, а). При отсутствии насыщения каждый из потоков и их отдельные составляющие можно рассматривать независимо один от другого. Так, полный поток обмотки возбуждения  $\dot{\Phi}_f$ , который был бы при холостом ходе машины, состоит из полезного потока  $\dot{\Phi}_{fad}$  и потока рассеяния  $\dot{\Phi}_{\sigma f}$ . В свою очередь полезный поток  $\dot{\Phi}_{fad}$  является геометрической разностью продольного потока в воздушном зазоре  $\dot{\Phi}_{\sigma d}$  и потока продольной реакции статора  $\dot{\Phi}_{ad}$ . Результирующий магнитный поток  $\dot{\Phi}_{f\Sigma}$ , сцепленный с обмоткой возбуждения, складывается из потока  $\dot{\Phi}_{\sigma d}$  и потока рассеяния  $\dot{\Phi}_{\sigma f}$ .

Рассмотрим, как изменится этот баланс, если предположить внезапное изменение, например увеличение потока продольной реакции статора на  $\Delta\dot{\Phi}_{ad/0/}$ . При этом будем считать, что кроме обмотки возбуждения никаких других контуров в продольной оси ротора не имеется.

В соответствии с законом Ленца приращение потока  $\Delta\dot{\Phi}_{ad/0/}$  вызовет ответную реакцию обмотки возбуждения  $\Delta\dot{\Phi}_{f/0/}$ , причем приращения потокосцеплений  $\Delta\dot{\Psi}_{ad/0/}$  и  $\Delta\dot{\Psi}_{ad/0/}$  должны компенсировать друг друга, т. е.

## 6.3 Сверхпереходные э. д. с. и реактивности синхронной машины

## 6.4 Сравнение реактивностей синхронной машины

## 6.5 Характеристики двигателей и нагрузки

## 6.6 Практический расчет начального сверхпереходного и ударного токов

# Глава 7

## Уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины

### 7.1 Общие замечания и допущения

Ранее уже отмечалось, что аналитическое исследование электромагнитного переходного процесса синхронной машины с учетом всех влияющих на него факторов представляет чрезвычайно сложную задачу. Чтобы несколько упростить ее, приходится вводить ряд допущений, придавая машине некоторые свойства и качества, которыми она в действительности не обладает, т. е. рассматривать в известной мере «идеализированную» машину. Несомненно, это вносит погрешности в оценку отдельных величин, однако, как показывает сопоставление получаемых величин с экспериментальными данными, обычно погрешности находятся в практически допустимых пределах. Следует особо подчеркнуть, что возможность использования тех или иных конкретных допущений зависит главным образом от характера и назначения решаемой задачи.

В § 2.12-1 были изложены основные допущения, обычно принимаемые в практических расчетах электромагнитных переходных процессов. Представляется полезным повторить некоторые из них и отметить часть дополнительных допущений, которые используются в дальнейшем. К таким допущениям нужно отнести следующие:

1. Магнитная система машины иенасыщена, в силу чего индуктивности машины не зависят от н. с. (или токов); величины самих индуктивностей при этом определяются для некоторого значения магнитной проницаемости стали магнитопровода.
2. Вместо действительных кривых распределения н. с. и индукции в воздушном зазоре по расточке статора принимают только их основные, первые гармонические, соответственно чему наведенные в статоре э. д. с. выражаются синусоидами основной частоты.
3. В магнитной системе машины отсутствуют какие-либо потери.
4. Конструктивное выполнение машины обеспечивает полную симметрию фазных обмоток статора. Равным образом ротор также симметричен относительно своих продольной и поперечной осей.
5. Предполагается, что как специально созданная продольная демпферная обмотка, так и все прочие естественные демпферные контуры, которые могут быть в продольной

оси ротора, заменены одной эквивалентной продольной демпферной обмоткой; аналогично предполагается, что в поперечной оси ротора также имеется только одна эквивалентная поперечная демпферная обмотка<sup>1</sup>.

6. Скорость вращения ротора машины в течение рассматриваемого переходного процесса постоянна и равна синхронной.

Даже для такой идеализированной машины анализ переходного процесса сопряжен со значительными трудностями, для преодоления которых приходится идти еще на некоторые упрощения. Сущность последних будет указана по ходу изложения.

Математические выкладки при учете демпферных обмоток значительно сложнее, и за громоздкостью получающихся выражений труднее понять их физический смысл. Поэтому вначале ограничимся рассмотрением машины без демпферных обмоток. Учет последних сделаем позднее, при этом для упрощения отступим от строгости самих выкладок и используем уже полученные в гл. 4 результаты.

## **7.2 Исходные уравнения**

## **7.3 Индуктивности обмоток синхронной машины**

## **7.4 Обобщенный вектор трехфазной системы**

## **7.5 Замена переменных**

## **7.6 Преобразование уравнений**

## **7.7 Выражения в операторной форме**

---

<sup>1</sup>Для турбогенераторов при более точном анализе требуется учет нескольких демпферных контуров в каждой оси ротора.



## Глава 8

# Форсировка возбуждения и развозбуждение синхронной машины

### 8.1 Общие замечания

Одной из наиболее эффективных и в то же время простых мер обеспечения надежности работы синхронных машин в большинстве аварийных условий является быстрое повышение их возбуждения или, как говорят, *быстродействующая форсировка возбуждения*. В зависимости от принятой системы возбуждения эффективность форсировки различна, что обуславливается особенностями выполнения каждой системы возбуждения. Это различие проявляется в возможных предельных величинах (потолках) токов возбуждения, а также в величинах скоростей нарастания тока возбуждения (принужденного).

Исследование переходного процесса при форсировке возбуждения в общем виде с учетом всех влияющих факторов очень сложно и практически выполнимо лишь с применением современной вычислительной техники. Существенное влияние на форсировку возбуждения оказывает насыщение магнитных систем как самой синхронной машины, так и элементов системы возбуждения. Это обстоятельство делает данную задачу нелинейной со всеми вытекающими отсюда затруднениями.

Несмотря на высказанные замечания, все же представляется целесообразным, даже на базе ранее принятых допущений (см. §??), рассмотреть процесс форсировки возбуждения и понять главным образом физическую сущность происходящих при этом явлений. Свою задачу ограничим случаями, когда машина имеет обычную электромашинную или ионную систему возбуждения. Здесь уместно подчеркнуть, что выбор той или иной системы возбуждения требует всестороннего подхода с различных точек зрения при одновременном учете ряда требований общего и специального характера.

Анализ переходного процесса при развозбуждении или гашении магнитного поля синхронной машины относительно проще, хотя бы уже по той причине, что этот процесс происходит, как правило, после отключения машины от сети. При этом насыщение магнитной системы сказывается также заметно, но даже при пренебрежении им можно получить достаточно правильное представление о протекании такого процесса.

В дальнейшем, так же как и в 7гл. 7, предполагается, что все величины цепей ротора приведены к статору и выражены в системе относительных единиц. Для упрощения записи специальные обозначения, указывающие такое приведение, опущены.

## **8.2 Включение обмотки возбуждения на постоянное напряжение**

## **8.3 Форсировка возбуждения при электромашинном возбудителе**

## **8.4 Форсировка при управляемых ионных и тиристорных системах возбуждения**

В последнее время широкое применение находят ионные и тиристорные системы возбуждения<sup>1</sup>; при этом используют управляемые ионные или тиристорные выпрямители.

Ионные и тиристорные системы возбуждения позволяют легко обеспечить при форсировке очень быстрое нарастание напряжения возбуждения и большую предельную величину последнего. Это достигается обычно установкой двух выпрямителей, включенных параллельно. Один из них обеспечивает возбуждение машины в нормальном режиме, а другой служит для форсировки возбуждения. Регулирование возбуждения машины в нормальных условиях производят, используя систему управления выпрямителей.

Поскольку ионные и тиристорные системы возбуждения практически безынерционны ( $T_e \approx 0,02$  сек.), можно считать, что при форсировке возбуждения напряжение на кольцах обмотки возбуждения синхронной машины возрастает до предельного  $u_{fпр}$  скачком. Поэтому все выражения, полученные ранее для форсировки возбуждения при электромашинном возбудителе, применимы и при указанных системах возбуждения, для чего достаточно положить в них  $T_e = 0$ ; это приводит к значительному их упрощению.

## **8.5 Гашение магнитного поля**

---

<sup>1</sup>Ведутся работы по созданию бесщеточных систем возбуждения; их динамические характеристики находятся в стадии исследования.

## Глава 9

# Внезапное короткое замыкание синхронной машины

### 9.1 Общие замечания

Анализ электромагнитного переходного процесса при внезапном коротком замыкании, рассматриваемый в настоящей главе, ограничен условием, что синхронная машина работает отдельно от других источников питания. Внешняя цепь ее статора при возникшем коротком замыкании характеризуется некоторым постоянным сопротивлением, преимущественно индуктивным.

Чтобы иметь некоторое представление о взаимном влиянии машин на характер протекания электромагнитного переходного процесса (при неизменной скорости их вращения), в конце главы данный вопрос кратко освещен для простейших условий, когда в схеме имеются две машины, связанные между собой через произвольные реактивности.

Вначале рассматривается переходный процесс в синхронной машине без демпферных обмоток и при отключенном устройстве автоматического регулирования возбуждения. В дальнейшем введен учет такого регулирования, используя материал предыдущей главы. Влияние и

учет демпферных обмоток изложен без строгих математических выкладок; при этом основное внимание обращено на вскрытие физической сущности явления и возможности упрощенной оценки этого влияния.

Практический интерес представляет протекание процесса при каскадном (или ступенчатом) отключении короткого замыкания и его повторном включении. В общем виде данный вопрос очень сложен. Поэтому здесь он рассмотрен применительно к условиям, когда в схеме имеется лишь одна машина.

### 9.2 Внезапное короткое замыкание синхронной машины без демпферных обмоток

### 9.3 Влияние и приближенный учет демпферных обмоток

Общий путь исследования электромагнитного переходного процесса внезапного короткого замыкания синхронной машины с демпферными обмотками принципиально тот же, что и в предыдущем параграфе. Такая машина характеризуется операторными реактивностями в обеих осях ротора. Каждая дополнительная обмотка на роторе повышает порядок определителя системы уравнений, аналогичной (9-7) и (9-8). Так, если по осям  $d$  и  $q$  распо-

ложено по одной демпферной обмотке, то  $p$  в определителе уже достигает пятой степени. При этом решение характеристического уравнения, получающегося путем приравнивания определителя нулю, в общем виде невозможно. Достаточно близкое к действительности решение можно получить, так же как и при отсутствии демпферных обмоток, пренебрегая поочередно активными сопротивлениями цепей ротора и статора.

При таком решении корни характеристического уравнения  $p_1$  и  $p_2$  могут быть определены по (9-12), где вместо  $x'_d$  и  $x_q$  нужно ввести соответственно  $x''_d$  и  $x''_q$ . Для нахождения значений  $T_a$  и  $x_2$  должна быть сделана аналогичная замена в (9-13) и (9-14).

#### **9.4    Влияние автоматического регулирования возбуждения при внезапном коротком замыкании**

#### **9.5    Каскадное отключение и повторное включение короткого замыкания**

#### **9.6    Взаимное электромагнитное влияние синхронных машин при переходном процессе**

# Глава 10

## Практические методы расчета переходного процесса короткого замыкания

### 10.1 Общие замечания

Полученные в гл. 9 общие выражения для тока при внезапном коротком замыкании позволяют с высокой точностью определить его величину в произвольный момент переходного процесса в цепи, питаемой одним генератором. Структура этих выражений показывает, что даже при столь простых условиях их применение требует большой вычислительной работы.

При переходе к схемам с несколькими генераторами, как показано в § 9.6, задача точного расчета переходного процесса короткого замыкания резко усложняется. Оставляя в стороне вопросы учета возникающих качаний генераторов и поведения присоединенных нагрузок, достаточно вспомнить, что изменения свободных токов в каждом из генераторов взаимно связаны между собой. При автоматическом регулировании возбуждения аналогичная связь имеет место также в приращениях принужденных токов. Трудность точного расчета дополнительно усугубляется различием параметров синхронной машины в продольной и поперечной осях ее ротора.

Использование приемов операционного исчисления для расчета переходных процессов короткого замыкания в мало-мальски сложной схеме сопряжено с преодолением весьма громоздких и трудоемких выкладок. Порядок характеристического уравнения быстро возрастает с увеличением числа машин в рассматриваемой схеме. Поэтому практическое применение такого метода расчета весьма ограничено. Его можно рассматривать лишь как эталон для оценки других приближенных методов расчета.

В силу указанных причин и с учетом того, что для решения многих практических задач не требуется знания точных результатов, разработаны приближенные методы расчета переходного процесса короткого замыкания. В дальнейшем рассмотрены только те из них, которые достаточно широко используются главным образом в практике советской электроэнергетики.

Основное требование, которому должен удовлетворять практический метод, заключается в простоте его выполнения, что прежде всего предотвращает возможность ошибок. Однако чем проще метод, тем на большем числе допущений он основан и тем, очевидно, меньше его точность. Самые простые методы позволяют иногда определить лишь порядок искомых величин, но этого часто бывает достаточно, чтобы обоснованно решить некоторые практические задачи. Почти, как правило, можно рекомендовать начать расчет переходного процесса короткого замыкания самым простым методом, а затем, если это

требуется, вводить уточнения.

Помимо ранее указанных допущений (см. § 2.1), в практических расчетах коротких замыканий дополнительно принимают, что:

## **10.2 Приближенный учет системы**

## **10.3 Расчет для выбора выключателей по отключающей способности**

## **10.4 Метод расчетных кривых**

## **10.5 Уточнение метода расчетных кривых**

## **10.6 Метод спрямленных характеристик**

## **Часть III**

### **Электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии трехфазной цепи**





## **Глава 11**

### **Основные положения в исследовании несимметричных переходных процессов**

#### **11.1 Общие замечания**

#### **11.2 Образование высших гармоник**

#### **11.3 Применимость метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов**



# Глава 12

## Параметры элементов для токов обратной и нулевой последовательностей

### 12.1 Общие замечания

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном симметричном режиме, а также в симметричном переходном процессе, по существу являются сопротивлениями прямой последовательности<sup>1</sup>. Этот термин вводить ранее не было нужды, поскольку токи были лишь одной последовательности.

При отсутствии магнитной связи между фазами какого-либо элемента его сопротивление не зависит от порядка чередования фаз тока. Активная и реактивная составляющие сопротивления такого элемента зависят только от частоты тока и, следовательно, для всех последовательностей одинаковы<sup>2</sup>, т. е.

$$r_1 = r_2 = r_0$$

и

$$x_1 = x_2 = x_0$$

соответственно

$$z_1 = z_2 = z_0$$

Для элемента, магнитносвязанные цепи которого неподвижны относительно друг друга, сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы, так как от перемены порядка чередования фаз симметричной трехфазной системы токов взаимная индукция между фазами такого элемента не изменяется.

Таким образом, для трансформаторов, автотрансформаторов, воздушных линий, кабелей и реакторов

$$r_1 = r_2$$

и

$$x_1 = x_2$$

---

<sup>1</sup>Исключение составляет реактивность, используемая при определении постоянной времени  $T_a$  (см § ??)

<sup>2</sup>Таковыми элементами можно практически считать реакторы

соответственно

$$z_1 = z_2$$

Система токов нулевой последовательности резко отличается от систем токов прямой и обратной последовательностей, вследствие чего сопротивления нулевой последовательности в общем случае весьма существенно отличаются от соответствующих сопротивлений двух других последовательностей.

Помимо определения индуктивных сопротивлений обратной и нулевой последовательностей, ниже также приведены указания к определению активных сопротивлений нулевой последовательности воздушных и кабельных линий. Учет последних часто необходим при расчете однофазных коротких замыканий, причем его выполнение обычно не вызывает трудностей, так как этот вид короткого замыкания в большинстве случаев характеризуется большой электрической удаленностью, что позволяет не считаться с изменением тока во времени.

## 12.2 Синхронные машины

Магнитный поток, созданный токами обратной последовательности синхронной частоты, вращаясь относительно ротора с двойной синхронной скоростью, встречает на своем пути непрерывно изменяющееся магнитное сопротивление; это обусловлено магнитной несимметрией ротора и тем, что наведенные в продольных и поперечных контурах ротора токи создают различные ответные реакции. Таким образом, при неизменной н. с. статора поток обратной последовательности гармонически изменяется с двойной синхронной скоростью в пределах между его наибольшим и наименьшим значениями, разница между которыми зависит от степени несимметрии ротора; она велика при резкой несимметрии ротора и, напротив, совсем исчезает при его полной симметрии.

В §11.2 было показано, что поток обратной последовательности синхронной частоты в общем случае вызывает в статоре нечетные гармоники, которые искажают синусоидальную форму магнитного поля статора. Это обстоятельство существенно затрудняет определение реактивности обратной последовательности синхронной машины и приводит к тому, что данная реактивность, строго говоря, не является параметром машины, так как она зависит от внешних условий (т. е. внешней реактивности, вида несимметрии и др.).

Для синхронной машины без демпферных обмоток в § 9.2 было получено выражение для реактивности

$$x_2 = \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q}, \quad (12.1)$$

которая по существу представляет собой реактивность обратной последовательности, определяемую как отношение подведенного синусоидального напряжения обратной последовательности синхронной частоты к основной гармонике тока обратной последовательности.

Эта реактивность может быть представлена схемой замещения, показанной на рис. 12.1. Ток в параллельной ветви с реактивностью дает значение третьей гармоники тока прямой последовательности, которая вызвана потоком обратной последовательности синхронной частоты.

Представим себе теперь, что напряжение обратной последовательности приложено не непосредственно к статору машины, а через произвольную реактивность  $x$ . Тогда общая реактивность обратной последовательности всей цепи, очевидно, будет:

$$x_{2\Sigma} = \frac{2(x'_d + x)(x_q + x)}{x'_d + x_q + 2x}$$

и на долю самой машины приходится величина

$$x_2 = \frac{2(x'_d + x)(x_q + x)}{x'_d + x_q + 2x} - x = \frac{2x'_d x_q + (x'_d + x_q)x}{x'_d + x_q + 2x},$$

которая, как видно, зависит от внешней реактивности  $x$ . По мере увеличения последней реактивность обратной последовательности машины стремится в пределе к

$$x_2 = \lim_{x \rightarrow \infty} = \frac{2x'_d x_q + (x'_d + x_q)x}{x'_d + x_q + 2x} = \frac{x'_d + x_q}{2}, \quad (12.2)$$

что соответствует отсутствию третьей гармоники тока. Эта реактивность получается из схемы замещения рис. 12.1, для чего достаточно разомкнуть рубильник  $P$ .

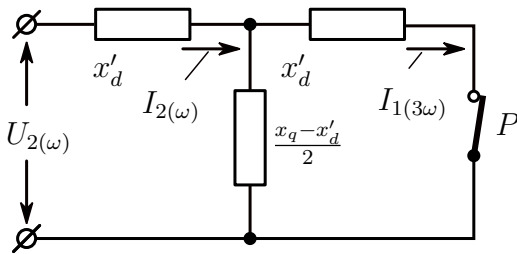


Рис. 12.1: Схема замещения, определяющая реактивность  $x_2$  синхронной машины с учетом влияния третьей гармоники тока прямой последовательности

Следовательно, принципиальная разница между выражениями (12.1) и (12.2) состоит в том, что первое из них дает значение  $x_2$  машины с учетом влияния третьей гармоники тока, а второе – без учета такого влияния. При симметричном роторе ( $x_q = x'_d$ ) оба выражения дают одно и то же значение что также следует из схемы замещения рис. 12.1.

До сих пор предполагалось, что обратнo-синхронное питание подано от источника бесконечной мощности, в силу чего, помимо основной гармоники, в статоре возникает еще только третья гармоника тока. Однако при несимметричном режиме машины (см. § 11.2) поле обратной последовательности основной частоты вызывает в статоре весь спектр нечетных гармоник. В этом случае, как показал Н. Н. Щедрин, схема замещения рис. 12.1 может быть развита в бесконечную цепную схему замещения, результирующая реактивность которой составляет:

$$x_2 = \sqrt{x'_d x_q}. \quad (12.3)$$

Эта реактивность также зависит от внешней реактивности и в пределе стремится к значению, определяемому по (12.2).

Для машины с демпферными обмотками реактивность  $x_2$  может быть определена по тем же выражениям, если заменить в них  $x'_d$  и  $x_q$  соответственно  $x''_d$  и  $x''_q$ . Величины реактивностей  $x''_d$  и  $x''_q$  обычно ближе друг к другу, чем величины  $x'_d$  и  $x_q$ . Поэтому у машин с полным демпфированием разница в значениях  $x_2$ , получаемых по разным выражениям, очень мала.

Поскольку выражения (12.1) – (12.3) почти равноценны, в большинстве практических расчетов целесообразно принимать для синхронных машин реактивность  $x_2$  по наиболее простому выражению (12.2), которое к тому же удовлетворяет нормальному правилу последовательного соединения реактивностей машины и ее внешней цепи. При необходимости учета высших гармоник надлежит применять более точное выражение (12.3).

В качестве приближенных соотношений принимают:

Для машин без демпферных обмоток

$$x_2 \approx 1,45x'_d;$$

Для турбогенераторов и машин с демпферными обмотками в обеих осях ротора

$$x_2 \approx 1,22x''_d.$$

В практических приближенных расчетах обычно идут на дополнительное упрощение, принимая для турбогенераторов и машин с продольно-поперечными демпферными обмотками

$$x_2 \approx x_d''.$$
 (12.4)

Токи нулевой последовательности создают практически только магнитные потоки рассеяния статорной обмотки, которые, как правило, меньше, чем при токах прямой или обратной последовательности, причем это уменьшение сильно зависит от типа обмотки. Поэтому величина  $x_0$  синхронных машин колеблется в широких пределах:

$$x_0 = (0,15 \div 0,6)x_d''.$$
 (12.5)

## 12.3 Асинхронные двигатели

Если в нормальных условиях асинхронный двигатель работает со скольжением  $s$ , то по отношению к магнитному потоку обратной последовательности синхронной частоты ротор двигателя, очевидно, имеет скольжение  $(2 - s)$ . Следовательно, сопротивление обратной последовательности асинхронного двигателя представляет собой его сопротивление при скольжении  $(2 - s)$ .

Кривая, показанная на рис. 12.2, иллюстрирует примерный характер относительного изменения реактивности асинхронного двигателя в функции скольжения<sup>3</sup>.

Как видно, с ростом  $s$  реактивность двигателя вначале резко падает, а затем ее снижение весьма незначительно. Это позволяет практически считать

$$x_2 \approx x_{s=1} = x_K,$$
 (12.6)

т. е. реактивность  $x_2$  двигателя равной его так называемой реактивности короткого замыкания (относительная величина которого близка к обратной величине относительного номинального пускового тока).

Реактивность нулевой последовательности асинхронного двигателя, как и синхронных машин, определяется только рассеянием статорной обмотки и сильно зависит от типа и конструкции последней. Достаточно надежные значения этой реактивности могут быть получены преимущественно опытным путем или по данным завода-изготовителя.

## 12.4 Обобщенная нагрузка

Реактивность обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от характера приемников электроэнергии и относительного участия каждого из них в рассматриваемой нагрузке. Для средней типовой промышленной нагрузки можно считать, что основная ее часть состоит из асинхронных двигателей, реактивность обратной последовательности которых, как показано в § 12.3, практически та же, что и в начальный момент внезапного нарушения режима. Поэтому для реактивности обратной последовательности обобщенной нагрузки в практических расчетах можно принимать, как и в § 6.5, величину

$$x_2 = 0,35,$$
 (12.7)

считая ее отнесенной к полной рабочей мощности в мегавольтамперах данной нагрузки и среднему номинальному напряжению той ступени, где она присоединена.

<sup>3</sup>За единицу реактивности здесь принята реактивность двигателя при его номинальном скольжении.

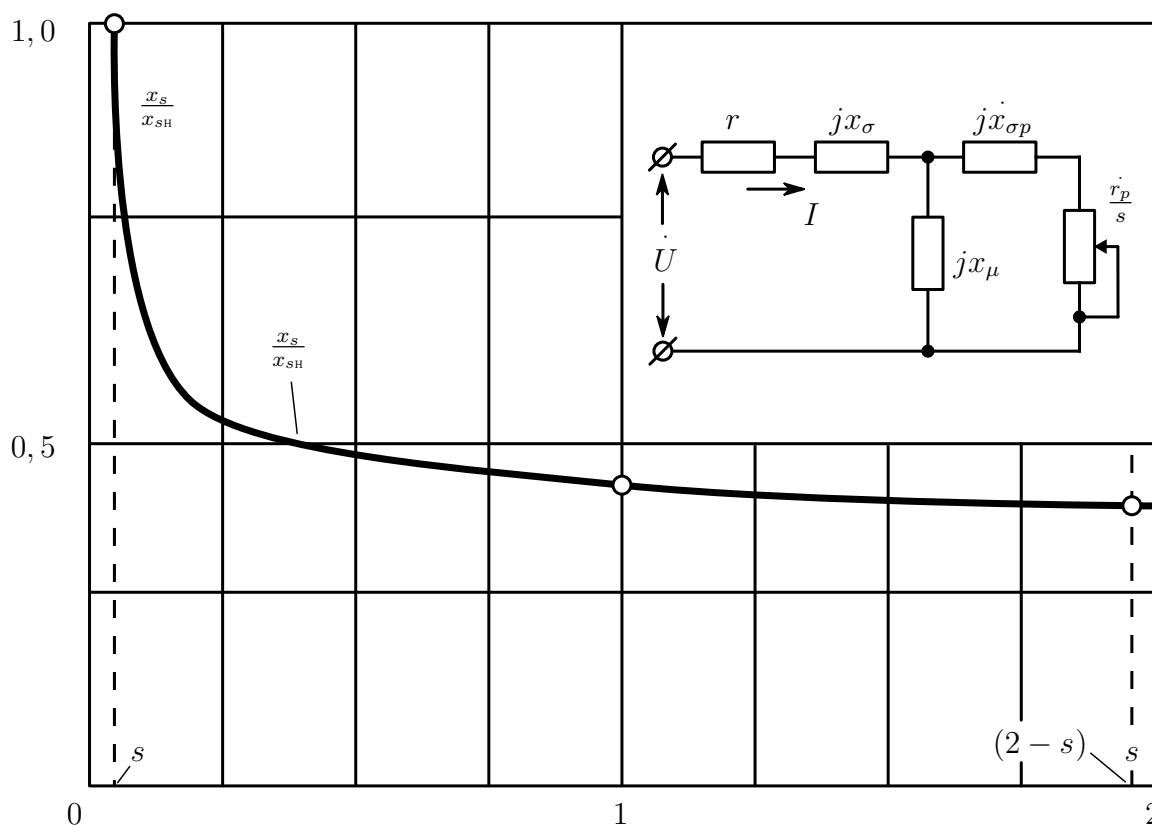


Рис. 12.2: Относительное изменение индуктивного сопротивления асинхронного двигателя в зависимости от скольжения.

Поскольку обобщенная нагрузка включает в себя сеть и понижающие трансформаторы, ее сопротивление нулевой последовательности обычно определяется именно этими элементами, рассмотрение которых приведено ниже. Привести какие-либо средние величины этого сопротивления не представляется возможным.

## 12.5 Трансформаторы<sup>4</sup>

Реактивность нулевой последовательности трансформатора в значительной мере определяется его конструкцией и соединением обмоток.

Со стороны обмотки, соединенной в треугольник или в звезду без заземленной нейтрали, независимо от того, как соединены другие обмотки, реактивность нулевой последовательности трансформатора, очевидно, бесконечно велика ( $x_0 = \infty$ ), так как при этих условиях вообще исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе. Следовательно, конечная, хотя иногда (см. ниже) и очень большая, реактивность нулевой последовательности трансформатора может быть только со стороны его обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью.

На рис. ??, а, б и в приведены основные варианты соединения обмоток двухобмоточного трансформатора, при которых приложенное к обмотке I напряжение нулевой последовательности вызывает в одной или в обеих обмотках ток той же последовательности. Справа, против каждого варианта соединения обмоток показаны схемы замещения трансформатора (без учета активных сопротивлений) для токов нулевой последовательности.

<sup>4</sup>Для общности проводимых здесь записей обмотки трансформатора обозначены порядковыми номерами I, II, III вместо В, С, Н, как это обычно принято.

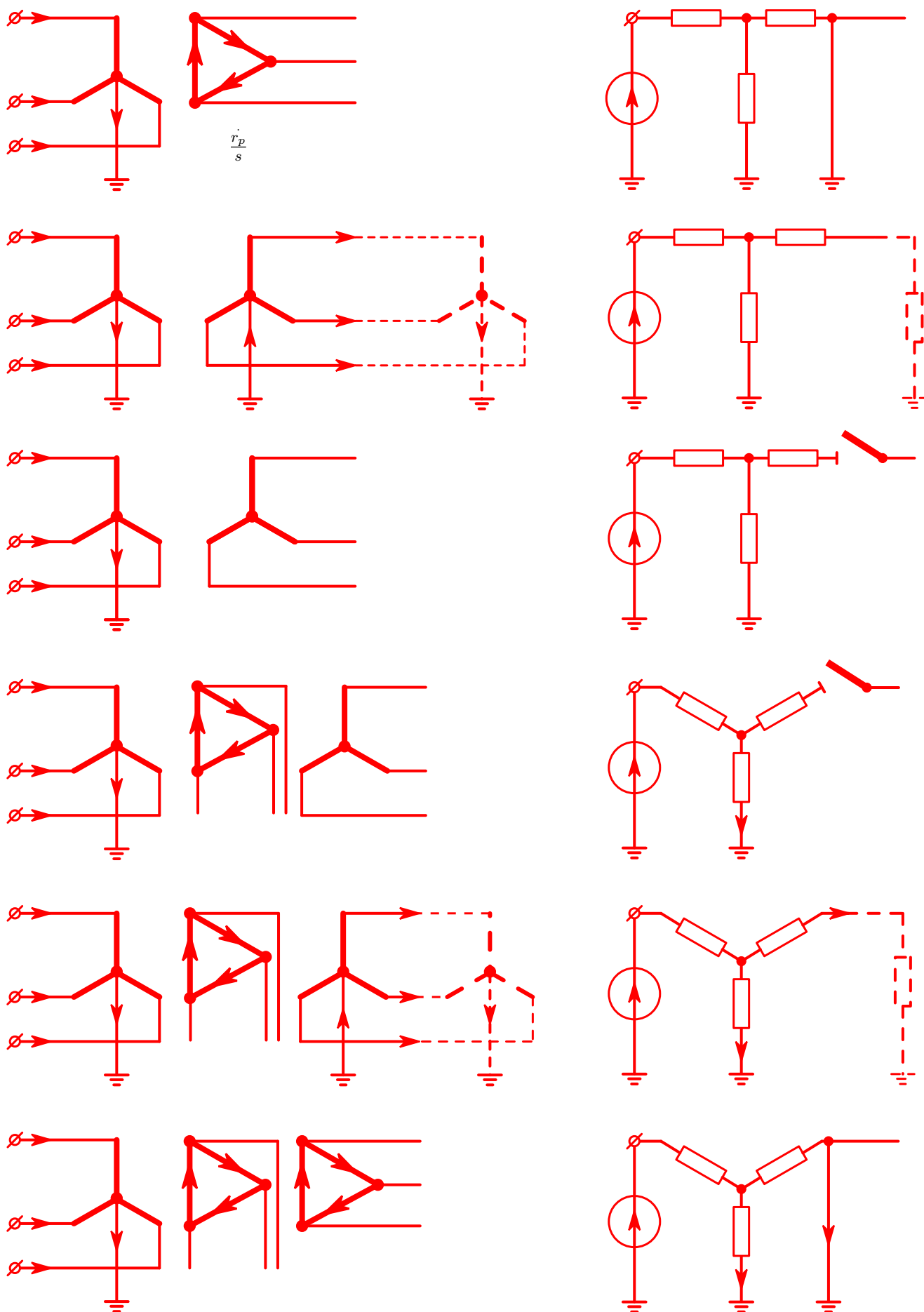


Рис. 12.3: Соединения обмоток трансформаторов и их схемы замещения для токов нулевой последовательности.



При соединении обмоток  $Y_0/\Delta$  (рис. 12.3, *а*) э. д. с. нулевой последовательности трансформатора целиком расходуется на проведение тока той же последовательности только через реактивность рассеяния обмотки, соединенной треугольником, так как этот ток (подобно третьей гармонике тока) не выходит за пределы данной обмотки. В схеме замещения это отражают закорачиванием ветви с  $x_{II}$ . Потенциал, равный нулю, на конце ветви  $x_{II}$  схемы замещения не указывает на искусственный перенос заземления нейтрали, как это иногда ошибочно воспринимают; он только соответствует условию, что данной ветвью схемы замещения трансформатора заканчивается путь циркуляции токов нулевой последовательности.

При соединении обмоток  $Y_0/Y_0$  представленная на рис. 12.3, *б* схема замещения предполагает, что на стороне обмотки *II* обеспечен путь для тока нулевой последовательности, т. е. в цепи этой обмотки имеется по меньшей мере еще одна заземленная нейтраль (см. пунктир). Если же этого нет, то схема замещения будет такой же, как и при соединении обмоток  $Y_0/Y$  (рис. 12.3, *в*), что соответствует режиму холостого хода трансформатора.

Оценим теперь величину реактивности намагничивания нулевой последовательности трансформатора  $x_{\mu 0}$ .

Для группы из трех однофазных трансформаторов, а также для трехфазных четырех- и пятистержневых (броневого) трансформаторов ток намагничивания нулевой последовательности очень мал, так как в этом случае условия для магнитного потока практически те же, что и при питании трансформатора от источника напряжения прямой (или обратной) последовательности. Поэтому в соответствии с принятым ранее (§ 2.1) допущением можно считать  $x_{\mu 0} = \infty$ .

Иные условия имеют место в трехфазных трехстержневых трансформаторах, где магнитные потоки нулевой последовательности вынуждены замыкаться через изолирующую среду и кожух трансформатора. Для проведения магнитного потока по пути со столь высоким магнитным сопротивлением необходим достаточно большой ток намагничивания; следовательно, реактивность  $x_{\mu 0}$  у трансформатора такого типа значительно меньше, чем  $x_{\mu 1}$ . В зависимости от конструкции этого типа трансформатора она находится в пределах  $x_{\mu 0} = (0,3 \div 1,0)$ . Имея в виду, что величина  $x_{II}$  все же значительно меньше  $x_{\mu 0}$ , можно практически считать, что и для трехстержневого трансформатора с соединением обмоток  $Y_0/\Delta$   $x_{\mu 0} \approx \infty$ .

В табл. ?? сведены изложенные выше указания относительно оценки реактивности нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов.

У трехобмоточных трансформаторов одна из обмоток, как правило, соединена в треугольник. Поэтому для них всегда можно принимать  $x_{\mu 0} = \infty$ .

Основные варианты соединения обмоток трехобмоточного трансформатора и соответствующие им схемы замещения нулевой последовательности (считая  $U_0$  приложенным со стороны обмотки *I*) приведены на рис. 12.3, *г*, *д* и *е*.

В варианте рис. 12.3, *г* ток нулевой последовательности в обмотке *III* отсутствует. Следовательно, в этом случае  $x_0 = x_I + x_{II} + x_{I-II}$ .

В варианте рис. 12.3, *д* предполагается, что путь для тока нулевой последовательности на стороне обмотки *III* обеспечен. В этом случае в схему нулевой последовательности трансформатор должен быть введен своей схемой замещения.

Наконец, в варианте 12.3, *е* компенсация тока нулевой последовательности обмотки *I* осуществляется токами, наведенными в обмотках *II* и *III*. В этом случае

$$x_0 = x_1 + \frac{x_{II}x_{III}}{x_{II} + x_{III}}.$$

## 12.6 Автотрансформаторы<sup>6</sup>

Обмотки автотрансформатора связаны между собой не только магнитно, но и электрически; поэтому здесь иные условия для протекания токов нулевой последовательности, которые должны быть отражены в схеме замещения нулевой последовательности автотрансформатора. При известных условиях, как показано ниже, даже при изолированной нейтрали автотрансформатора в его обмотках возможна циркуляция токов нулевой последовательности.

При глухом заземлении нейтрали автотрансформатора его схема замещения нулевой последовательности аналогична схеме соответствующего трансформатора. Так, если у автотрансформатора нет третьей обмотки и во вторичной цепи обеспечен путь для тока нулевой последовательности, его схема замещения (при пренебрежении намагничивающим током и активными сопротивлениями) представляется суммарной реактивностью рассеяния (рис. 12.6, а). При наличии третьей обмотки<sup>8</sup>, соединенной треугольником, схема замещения имеет тот же вид, что и у трехобмоточного трансформатора при соответственном соединении его обмоток (рис. 12.6, в).

Следует подчеркнуть, что непосредственно из схемы замещения нулевой последовательности автотрансформатора нельзя получить ток, протекающий в его нейтрали. При указанных на рис. 12.6 направлениях токов искомый ток в нейтрали равен утроенной разности токов нулевой последовательности первичной и вторичной цепей, т. е.  $\dot{I}_N = 3(\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0II})$ , причем каждый из них должен быть отнесен к своей ступени напряжения, а не к какой-либо одной, для которой составлена схема замещения.

Допустим теперь, что нейтраль автотрансформатора заземлена через реактивность  $X_N$  (рис. 12.6, б). Если напряжение на нейтрали равно  $U_N$  и напряжения выводов ступеней I и II относительно нейтрали составляют соответственно  $U_{NI}$  и  $U_{NII}$  то для результирующей реактивности нулевой последовательности между выводами ступеней I и II автотрансформатора, приведенной к ступени I, можно написать:

$$x'_{I-II} = \frac{(U_{NI} + U_N) - (U_{NII} + U_N)U_I/U_{II}}{I_{0I}} = \frac{U_{NI} - \overset{\circ}{U}_{NII}}{I_{0I}} + \frac{U_N}{I_{0I}} \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}}\right);$$

поскольку

$$\frac{U_{NI} - \overset{\circ}{U}_{NII}}{I_{0I}} = x_{I-II},$$

где  $x_{I-II}$  — реактивность рассеяния автотрансформатора, отнесенная к ступени I, и

$$\frac{U_N}{I_{0I}} = \frac{3x_N(I_{0I} - I_{0II})}{I_{0I}} = 3x_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}}\right),$$

то окончательно получим:

$$x'_{I-II} = x_{I-II} + 3x_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}}\right)^2. \quad (12.8)$$

Данное выражение, разумеется, справедливо также и в том случае, когда реактивности представлены в относительных единицах, причем его запись предполагает, что реактивность  $x_N$  отнесена к базисному напряжению ступени I.

<sup>6</sup>См. сноску к § 12.5

<sup>8</sup>Силовые автотрансформаторы, как правило, снабжены такой обмоткой

Аналогичным образом для автотрансформатора, имеющего третью обмотку, соединенную треугольником (рис. ??, з), нетрудно найти результирующие реактивности нулевой последовательности между другими парами его обмоток, также отнесенные к ступени  $I$ :

$$x'_{I-III} = x_{I-III} + 3x_N; \quad (12.9)$$

$$x'_{I-III} = x_{II-III} + 3x_N \left( \frac{U_I}{U_{II}} \right)^2. \quad (12.10)$$

Используя (12.8) – (12.10), по известным формулам для трехобмоточного трансформатора (см. приложение П-7) находим реактивности трехлучевой схемы замещения:

$$\left. \begin{aligned} x'_I &= x_I + 3x_N \left( 1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right); \\ x'_{II} &= x_{II} + 3x_N \frac{(U_I - U_{II})U_I}{U_{II}^2}; \\ x'_{III} &= x_{III} + 3x_N \frac{U_I}{U_{II}}. \end{aligned} \right\} \quad (12.11)$$

У автотрансформатора без третьей обмотки разземление нейтрали приводит к тому, что в схеме нулевой последовательности такой автотрансформатор оказывается в режиме холостого хода; его ток намагничивания достаточно мал и им можно пренебречь, поэтому  $x_{\mu_0} = \infty$ .

Иные условия имеют место при разземлении нейтрали автотрансформатора, который снабжен третьей обмоткой, соединенной треугольником. В этом случае циркуляция тока нулевой последовательности возможна [1].

## 12.7 Воздушные линии

Ток нулевой последовательности воздушной линии возвращается через землю и по заземленным цепям, расположенным параллельно данной линии (защитные тросы, рельсовые пути вдоль линии и пр.). Главная трудность достоверного определения сопротивления нулевой последовательности воздушной линии связана с учетом распределения тока в земле; Точное нахождение последнего в общем виде представляет собой весьма сложную проблему. Достаточно полное и строгое решение в предположении постоянства электрической проводимости земли и неограниченности ее размеров выполнено Карсоном. Установленные на основании его выводов приближенные формулы позволяют с достаточной для практики точностью вычислить отдельные составляющие и полное сопротивление нулевой последовательности воздушной линии при токах промышленной частоты и обычно встречающихся значениях проводимости земли. Эти формулы с краткими пояснениями приведены ниже, причем их окончательный вид дан для частоты  $f = 50$  гц.

Распределение переменного тока в земле выражается сложной закономерностью, аналогичной закономерности распределения тока в массивных проводниках.

Представим себе однопроводную линию переменного тока, обратным проводом которой служит земля (рис. ??), или, как ее иначе называют, линию «провод – земля». Характер изменения плотности тока в земле по мере удаления в стороны и углубления в землю иллюстрируют кривые, показанные на рис. ??. Ток в земле как бы подтягивается к проводнику; соответственно наибольшая плотность тока имеет место на поверхности земли непосредственно под самим проводником.

Индуктивность такой линии, как показал Карсон, может быть определена как индуктивность эквивалентной двухпроводной линии с расстоянием между проводами  $D_3$

(рис. ??). Это расстояние называется эквивалентной глубиной возврата тока через землю и может быть определено по формуле, предложенной Карсоном:

$$D_3 = \frac{2,085}{\sqrt{f\lambda}10^{-9}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}, \quad (12.12)$$

где  $f$  – частота тока,  $\text{Гц}$ ;  $\lambda$  – удельная проводимость земли,  $1/\text{ом} \cdot \text{см}$ .

При  $f = 50 \text{ Гц}$  и среднем значении  $\lambda = 10^{-4} 1/\text{ом} \cdot \text{см}$  величина  $D_3 = 935 \text{ м}$ . При отсутствии данных о проводимости земли обычно принимают  $D_3 = 1000 \text{ м}$ .

Таким образом, индуктивное сопротивление линии «провод – земля» легко определить по известной формуле для двухпроводной линии:

$$x_L = 0,145 l g \frac{D_3}{r_3}, \text{ ом/км}. \quad (12.13)$$

Здесь  $r_3$  – эквивалентный радиус провода, значения которого составляют:

Для витых медных проводников в зависимости от числа прядей	$r_3 = (0,724 \div 0,771)r$ ;
Для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов марки А, АС, АСО, АСУ	$r_3 = 0,95r$ ;
	где $r$ – истинный радиус провода.

Для линий с расщепленными проводами в (12.13) вместо  $r_3$  следует вводить средний геометрический радиус  $r_{\text{ср}}$  системы проводов одной фазы, который находят из выражения:

$$r_{\text{ср}} = \sqrt[n]{r_3 a_{\text{ср}}^{n-1}}, \quad (12.14)$$

где  $n$  – число проводов в фазе;

$a_{\text{ср}}$  – среднее геометрическое расстояние между проводами одной фазы.

Все линейные величины, входящие под знак логарифма в (12.13) и дальнейших формулах, должны быть выражены в одних и тех же (вообще говоря, произвольных) единицах.

Активное сопротивление линии «провод – земля» складывается из активного сопротивления провода  $r_{\text{п}}$  и дополнительного сопротивления  $r_3$ , учитывающего потерю активной мощности в земле от протекающего в ней тока, т. е.

$$r = r_{\text{п}} + r_3. \quad (12.15)$$

Сопротивление  $r_3$  может быть определено из приближенного выражения:

$$r_3 = \pi f \cdot 10^{-4} r_3, \text{ ом/км}, \quad (12.16)$$

которое при  $f = 50 \text{ Гц}$  дает  $r_3 = 0,05 \text{ ом/км}$ .

Следует обратить внимание, что величина  $r_3$  практически не зависит от проводимости земли. Этот на первый взгляд парадоксальный вывод объясняется тем, что с изменением проводимости земли плотность тока в ней меняется; при этом потери активной мощности при заданной частоте тока остаются почти постоянными. Линейная зависимость  $r_3$  от частоты  $f$  вызвана соответственным проявлением поверхностного эффекта земли.

Сопротивление, обусловленное взаимоиנדукцией между двумя параллельными линиями «провод – земля» с расстоянием  $d$  между осями их проводов (если оно значительно меньше величины  $D_3$ ), можно определить из выражения:

$$Z_M = 0,05 + j0,145 l g \frac{D_3}{d}, \text{ ом/км}, \quad (12.17)$$

где активная составляющая соответствует потере активной мощности, возникающей от протекания тока в земле.

Для трехфазной одноцепной линии с полным циклом транспозиции проводов сопротивление взаимной индукции между фазами при возврате тока через землю следует определять по (12.17), заменив в последнем  $d$  средним геометрическим расстоянием между проводами фаз  $a$ ,  $b$  и  $c$ :

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}} \quad (12.18)$$

т. е.

$$Z_{\text{Мср}} = 0,05 + j0,145lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}}, \text{ ом/км} , \quad (12.19)$$

Зная  $Z_L$  и  $Z_{\text{Мср}}$ , нетрудно найти сопротивление нулевой последовательности одноцепной трехфазной линии. Оно численно равно эффективному значению напряжения, которое должно быть приложено к каждому проводу данной линии, чтобы покрыть падение напряжения при протекании в фазах токов нулевой последовательности с эффективным значением  $1a$  ( $\dot{I}_a = \dot{I}_b = \dot{I}_c = 1a$ ), т. е.

$$Z_0 = Z_L + Z_{\text{Мср}} + Z_{\text{Мср}} = Z_L + 2Z_{\text{Мср}}; \quad (12.20)$$

после подстановки (12.13), (12.15), (12.16) и (12.19) и преобразования имеем:

$$Z_0 = r_{\text{п}} + 0,15 + j0,435lg \frac{D_3}{R_{\text{ср}}}, \text{ ом/км} , \quad (12.21)$$

где  $R_{\text{ср}} = \sqrt[3]{r_3 D_{\text{ср}}^2}$  – средний геометрический радиус системы трех проводов линии.

Здесь уместно заметить, что если по линии протекает ток прямой последовательности с эффективным значением  $1a$  (т. е.  $\dot{I}_a = 1$ ,  $\dot{I}_b = a^2$ ,  $\dot{I}_c = a$ ), то<sup>9</sup>

$$Z_1 = Z_L + a^2 Z_{\text{Мср}} + a Z_{\text{Мср}} = Z_L - Z_{\text{Мср}}; \quad (12.22)$$

после подстановки и преобразования имеем известную формулу:

$$Z_1 = r_{\text{п}} + 0,145lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_3}, \text{ ом/км} . \quad (12.23)$$

Из (12.20) и (12.22) непосредственно следует, чем вызвано различие между  $Z_1$  и  $Z_0$  линии. В то время как при токе прямой (или обратной) последовательности взаимная индукция с другими фазами уменьшает сопротивление фазы, при токе нулевой последовательности она, напротив, увеличивает его. Поскольку  $Z_L$  и  $Z_{\text{Мср}}$  у линий соизмеримы, величины  $Z_1$  и  $Z_0$  резко отличаются между собой.

Из тех же выражений вытекают важные соотношения:

$$Z_L = (Z_0 + 2Z_1)/3; \quad (12.24)$$

$$Z_{\text{Мср}} = (Z_0 - Z_1)/3. \quad (12.25)$$

<sup>9</sup>Возможность представления трехфазной линии при протекании по ней токов прямой (или обратной) последовательности тремя линиями «провод – земля» вытекает из того, что результирующее влияние фиктивных обратных проводов этих линий практически отсутствует, так как сумма токов в этих проводах равна нулю.

Сопротивление нулевой последовательности каждой цепи двухцепной линии дополнительно увеличивается<sup>10</sup> благодаря взаимоиндукции с проводами параллельной цепи. Сопротивление взаимоиндукции между проводом одной цепи и тремя проводами другой цепи можно определить по (12.19), где обе составляющие должны быть увеличены в 3 раза и вместо  $D_{\text{ср}}$  введено среднее геометрическое расстояние  $D_{I-II}$  между цепями, определяемое через расстояния от каждого провода ( $a, b, c$ ) цепи  $I$  до каждого провода ( $a', b', c'$ ) цепи  $II$ :

$$D_{I-II} = \sqrt[9]{d_{aa'}d_{ab'}d_{ac'}d_{ba'}d_{bb'}d_{bc'}d_{ca'}d_{cb'}d_{cc'}}. \quad (12.26)$$

Следовательно, искомое сопротивление

$$Z_{I-II0} = 0,15 + 0,435 \lg \frac{D_3}{D_{I-II}}, \text{ ом/км}. \quad (12.27)$$

Следовательно, сопротивление нулевой последовательности двухцепной линии, считая в общем случае цепи неодинаковыми, определяют из известной схемы замещения двух магнитносвязанных цепей, как показано на рис. 12.1. При идентичности параллельных цепей ( $Z_{I0} = Z_{II0} = Z_0$ ) сопротивление нулевой последовательности каждой из них, очевидно, будет:

$$Z'_0 = Z_0 + Z_{I-II0} \quad (12.28)$$

и их результирующее сопротивление (т. е. сопротивление на фазу двухцепной линии)

$$Z''_0 = 0,5Z'_0 = 0,5(Z_0 + Z_{I-II0}). \quad (12.29)$$

## 12.8 Кабели

<sup>10</sup>При прохождении токов в обеих цепях в одну сторону.

# Глава 13

## Схемы отдельных последовательностей

### 13.1 Общие замечания

При применении метода симметричных составляющих к расчету любого несимметричного режима или процесса одной из первоочередных задач является составление схем замещения в общем случае всех трех последовательностей (прямой, обратной и нулевой).

При аналитическом решении поставленной задачи по этим схемам находят результирующие сопротивления отдельных последовательностей рассматриваемой системы относительно места, где возникла несимметрия. Из схемы замещения прямой последовательности, помимо того, находят результирующую э. д. с. относительно той же точки.

Когда используют расчетные модели (или столы), надобность в определении таких результирующих величин отпадает, так как в этом случае после объединения схем замещения отдельных последовательностей в комплексную схему для рассматриваемого вида несимметрии (см. § 14-7 и 15-6) токи и напряжения отдельных последовательностей можно найти в некотором масштабе по показаниям измерительных приборов.

Схемы замещения отдельных последовательностей составляют, как обычно, в соответствии с указаниями § 2-4. В частности, элементы схем замещения выражают в именovaných или относительных единицах, приводя соответственно к выбранной основной ступени напряжения или к выбранным базисным условиям.

### 13.2 Схемы прямой и обратной последовательности

Схема прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима или процесса. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени в нее вводят генераторы и нагрузки соответствующими реактивностями и э. д. с. Все остальные элементы вводят в схему неизменными сопротивлениями.

Поскольку пути циркуляции токов обратной последовательности те же, что и токов прямой последовательности, схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности. Различие между ними состоит прежде всего в том, что в схеме обратной последовательности э. д. с. всех генерирующих ветвей условно принимают равными нулю (см. § 11-3); кроме того, считают, что реактивности обратной последовательности синхронных машин и нагрузок практически постоянны и не зависят от вида и условий возникшей несимметрии, а также от продолжительности переходного процесса.

Началом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных

ветвей; это точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности.

Концом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия. При продольной несимметрии каждая из схем имеет два конца; ими являются две точки, между которыми расположена данная продольная несимметрия. К концу или между концами схем отдельных последовательностей приложены напряжения соответствующих последовательностей, возникающие в месте несимметрии.

### 13.3 Схема нулевой последовательности

Токи нулевой последовательности по существу являются однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю и параллельные ей цепи. В силу этого путь циркуляции токов нулевой последовательности резко отличается от пути, по которому проходят токи прямой или обратной последовательности.

Схема нулевой последовательности в значительной мере определяется соединением обмоток участвующих трансформаторов и автотрансформаторов.

*Составление схемы нулевой последовательности следует начинать, как правило, от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности.* В зависимости от вида несимметрии это напряжение прикладывается или относительно земли (поперечная несимметрия, **рис. 13-1,а**) или последовательно, в расщелку фазных проводов (продольная несимметрия, **рис. 13-1,б**).

Исходя из соответствующего данной несимметрии включения напряжения нулевой последовательности, далее следует выявить в пределах каждой электрически связанной цепи возможные пути протекания токов нулевой последовательности.

Когда напряжение нулевой последовательности приложено относительно земли, то при отсутствии емкостной проводимости для циркуляции токов нулевой последовательности необходима по меньшей мере одна заземленная нейтраль в той же электрически связанной цепи, где приложено это напряжение. При нескольких заземленных нейтральных в этой цепи образуется соответственно несколько параллельных контуров для токов нулевой последовательности.

При продольной несимметрии, т. е. когда напряжение нулевой последовательности введено последовательно, в фазные провода, циркуляция токов нулевой последовательности возможна даже при отсутствии заземленных нейтралей, если при этом имеется замкнутый контур через обходные пути той же электрически связанной цепи<sup>1</sup>. При отсутствии таких путей протекание токов нулевой последовательности в рассматриваемых условиях возможно только в том случае, если в той же электрически связанной цепи имеются заземленные нейтрали с обеих сторон от места, где приложено напряжение нулевой последовательности.

*Сопrotивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, генератора, двигателя, нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной.* Это обусловлено тем, что схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а через указанное сопротивление протекает сумма токов нулевой последовательности всех трех фаз.

Участие трансформаторов и автотрансформаторов в схеме нулевой последовательности достаточно подробно было рассмотрено в **§ 12-5** и **12-6**. В частности, сопротивление, введенное в нейтраль автотрансформатора, участвует в схеме замещения нулевой последовательности согласно **рис. 12-5,г**; реактивности этой схемы находят по **(12-11)**.

<sup>1</sup>При этом в земле циркулирует наведенный ток, следуя по трассе линии.



На **рис. 13-2** показан пример составления схемы нулевой последовательности для случая, когда напряжение нулевой последовательности возникает между проводами и землей (поперечная несимметрия). Стрелками указаны пути циркуляции токов нулевой последовательности при рассматриваемых условиях. Обмотки трансформаторов, автотрансформатора и прочие элементы схемы **рис. 13-2,о** обозначены порядковыми номерами, которые сохранены в обозначениях элементов схемы нулевой последовательности.

Поскольку в цепи среднего напряжения автотрансформатора имеется путь для токов нулевой последовательности, автотрансформатор входит своей полной схемой замещения. Циркуляция тока нулевой последовательности в обмотке 12 трансформатора Т-2 обеспечена через заземленную нейтраль нагрузки. Этот трансформатор предполагается трехстержневым, поэтому учтена его реактивность намагничивания нулевой последовательности. Для другого трансформатора и автотрансформатора указания об их конструкции практически не нужны, так как они имеют обмотки, соединенные треугольником.

Если предположить, что в той же точке напряжение нулевой последовательности приложено в рассечку проводов, то легко убедиться, что в этом случае схема нулевой последовательности останется той же, но ее результирующее сопротивление будет совсем иным (см. **§ 13-4**).

В **§ 12-7** уже указывалось, что взаимоиנדукция нулевой последовательности между параллельными цепями воздушных линий может сказываться весьма существенно. Поэтому ее нужно учитывать при составлении схемы нулевой последовательности, вводя такие цепи соответствующими схемами замещения. В приложении **П-8** приведен ряд схем замещения нулевой последовательности для нескольких типовых случаев, где требуется учет взаимоиנדукции между цепями.

Н а ч а л о м с х е м ы н у л е в о й п о с л е д о в а т е л ь н о с т и считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом, а ее концом — точку, где возникла несимметрия. При продольной несимметрии схема нулевой последовательности имеет два конца (границы места несимметрии); при этом следует отметить, что когда нейтраль системы не заземлена, начало схемы уже теряет смысл, так как в общем случае точка нулевого потенциала может перемещаться в зависимости от характера продольной несимметрии, места ее возникновения и других факторов.

## 13.4 Результирующие э. д. с. и сопротивления

Следующий этап аналитического расчета какого-либо несимметричного режима или процесса обычно заключается в определении результирующих сопротивлений схем отдельных последовательностей относительно точки, где возникла та или иная несимметрия. Помимо того, на этом этапе из схемы прямой последовательности находят также результирующую э. д. с. относительно той же точки. Необходимые для этого преобразования схем производят в соответствии с указаниями **§ ??**. При этом нужно особо иметь в виду принципиальное различие в преобразовании схем при поперечной и продольной несимметрии.

Обратимся к конкретной схеме **рис. 13-3,а** и проследим на ней, в чем именно состоит это различие. Все элементы этой схемы пронумерованы и их номера сохранены для обозначения соответствующих элементов в схемах замещения отдельных последовательностей.

При поперечной несимметрии в точке М схема замещения прямой последовательности имеет вид, представленный на **рис. 13-3,б**. Последовательно соединенные в ней элементы 1 и 2, а также 5 и 6 обозначены соответственно номерами 8 и 9. Для определения результирующих э. д. с. и сопротивления относительно точки М достаточно заменить

ветвь 9 с  $E = 0$  и ветвь, получаемую сложением элемента 8 с параллельно соединенными элементами 3 и 4 и имеющую э. д. с.  $E$ , одной эквивалентной (рис. 13-3,в). Схема обратной последовательности и ее преобразование аналогичны, за исключением того, что в ней отсутствуют э. д. с. источников. Схему нулевой последовательности (рис. 13-3,г) также легко преобразовать путем последовательного и параллельного сложения ветвей<sup>2</sup>.

Пусть теперь в точке  $M$  возникла продольная несимметрия. В этом случае напряжение прямой последовательности в точке  $M$  должно быть введено в расщелку цепи элемента 4 (рис. 13-3,д). Для определения результирующих э. д. с. и сопротивления схемы относительно точки  $M$  в данном случае необходимо вначале сложить последовательно элементы 8 и 9. Затем образовавшуюся ветвь 10 с э. д. с.  $E$  и ветвь 3 (рис. 13-3,е) следует заменить эквивалентной, что даст искомую результирующую э. д. с. относительно точки  $M$ , а для нахождения результирующего сопротивления относительно той же точки достаточно к сопротивлению полученной эквивалентной ветви прибавить сопротивление элемента 4.

Схема обратной последовательности аналогична схеме (рис. 13-3,д); в ней лишь отсутствует э. д. с. источника. Ее результирующее сопротивление находится так же, как и схемы прямой последовательности.

В схему нулевой последовательности (рис. 13-3,ж) двухцепная линия введена своей трехлучевой схемой замещения с элементами 11, 12 и 13, с тем чтобы учесть взаимную индукцию между цепями, находящимися теперь в различных условиях. Для нахождения результирующего сопротивления схемы здесь нужно сопротивление элемента 11 сложить параллельно с суммой сопротивлений элементов 2, 13, 5 и 7 (последний входит утроенной величиной) и затем прибавить сопротивление элемента 12.

Соотношения между величинами результирующих сопротивлений одноименной последовательности при поперечной и продольной несимметриях в одной и той же точке могут быть самыми различными в зависимости от характера схемы, места несимметрии и других факторов.

## 13.5 Распределение и трансформация токов и напряжений

Фазные токи и напряжения при несимметричных режимах или процессах проще всего находить путем суммирования симметричных составляющих. Поскольку рассматриваемые трехфазные схемы (или устройства) предполагаются выполненными симметрично, распределение токов и напряжений каждой последовательности находят в схеме одноименной последовательности, руководствуясь известными правилами и законами распределения токов и напряжений в линейных электрических цепях.

Вследствие того, что схемы обратной и нулевой последовательностей являются пассивными и их элементы остаются неизменными в течение всего переходного процесса, часто представляется целесообразным использовать коэффициенты распределения (см. §??), принимая за единицу ток каждой последовательности в месте несимметричного повреждения. При поперечной и продольной несимметриях в одной и той же точке эти коэффициенты различны. Однако при разных видах несимметрии одного характера (т. е. или поперечной, или продольной), возникающей в одной и той же точке системы, они одинаковы.

При определении фазных величин за трансформаторами нужно иметь в виду, что токи и напряжения при переходе через трансформатор изменяются не только по величине, но и по фазе в зависимости от соединения его обмоток.

<sup>2</sup>Здесь сопротивления элементов 3 и 4 в общем случае подсчитывают с учетом взаимной индукции между цепями линии

Обратимся к рис. 13-4, где приведена принципиальная схема трансформатора с соединением обмоток  $Y_0/\Delta - 11$ . Если число витков фазных обмоток соответственно равны  $\omega_Y$  и  $\omega_\Delta$ , то линейный коэффициент трансформации (см. §??)

$$k = \sqrt{3} \omega_Y / \omega_\Delta.$$

При заданных фазных токах  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  в соответствии с принятыми на рис. 13-4 положительными направлениями для токов в линейных проводах за треугольником имеем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a\Delta} - \dot{I}_{b\Delta} = (\dot{I}_A - \dot{I}_B) \frac{\omega_Y}{\omega_\Delta} = \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_B}{\sqrt{3}} \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b\Delta} - \dot{I}_{c\Delta} = (\dot{I}_B - \dot{I}_C) \frac{\omega_Y}{\omega_\Delta} = \frac{\dot{I}_B - \dot{I}_C}{\sqrt{3}} \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c\Delta} - \dot{I}_{a\Delta} = (\dot{I}_C - \dot{I}_A) \frac{\omega_Y}{\omega_\Delta} = \frac{\dot{I}_C - \dot{I}_A}{\sqrt{3}} \end{aligned} \right\} \quad (13.1)$$

Эту запись можно видоизменить, выразив токи через их симметричные составляющие. Так, например, для тока  $\dot{I}_a$  получим:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \frac{(\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_0 - a^2 \dot{I}_{A1} - a \dot{I}_{A2} - \dot{I}_0)}{\sqrt{3}} k = \\ &= \frac{(1 - a^2) \dot{I}_{A1} + (1 - a) \dot{I}_{A2}}{\sqrt{3}} k = \\ &= (\dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ}) k, \end{aligned} \quad (13.2)$$

откуда, в частности, видно, что, как и следовало ожидать, линейные токи за треугольником не содержат составляющих нулевой последовательности.

Аналогично могут быть найдены напряжения за рассматриваемым трансформатором. Если  $\dot{U}_A, \dot{U}_B$  и  $\dot{U}_C$  — фазные напряжения со стороны звезды, включающие в себя падения напряжения в самом трансформаторе<sup>3</sup>, то искомые фазные напряжения со стороны треугольника будут:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{\sqrt{3}} \frac{1}{k} \\ \dot{U}_b &= \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{\sqrt{3}} \frac{1}{k} \\ \dot{U}_c &= \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_A}{\sqrt{3}} \frac{1}{k} \end{aligned} \right\} \quad (13.3)$$

или при выражении напряжений через симметричные составляющие, например, для напряжения  $\dot{U}_a$  будем иметь:

$$\dot{U}_a = (\dot{U}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{U}_{A2} e^{-j30^\circ}) \frac{1}{k} \quad (13.4)$$

Из (13.3) и (13.4) следует, что напряжения на стороне треугольника не зависят от напряжения нулевой последовательности на стороне звезды. В то же время, если нейтраль системы на стороне треугольника смещена на  $\dot{U}_{0\Delta}$ , для определения фазных напряжений относительно земли к значениям по (13.3) и (13.4) нужно прибавить  $\dot{U}_{0\Delta}$ .

Структура (13.5) и (13.4) показывает, что при переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, обмотки которого соединены по группе  $Y_0/\Delta - 11$ ,

<sup>3</sup>Эти напряжения по существу измерены за трансформатором, но приведены к стороне звезды, т. е.  $\dot{U}_A = \dot{U}_a, \dot{U}_B = \dot{U}_a, \dot{U}_C = \dot{U}_c$ .

векторы прямой последовательности повертываются на  $30^\circ$  в направлении вращения векторов, а векторы обратной последовательности — на  $30^\circ$  в противоположном направлении (рис. 13-5).

При переходе через трансформатор в обратном направлении угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

Наиболее простые соотношения получаются для трансформатора с соединением обмоток по группе 12, так как в этом случае угловые смещения токов и напряжений вообще отсутствуют. При этом, когда имеется соединение  $Y_0/Y_0$ , должны быть учтены трансформируемые составляющие нулевой последовательности.

При нечетной группе соединения обмоток в тех случаях, когда не требуется знать истинной взаимной ориентировки векторных диаграмм на обеих сторонах трансформатора, можно для простоты считать его соединение по группе 3 (или 9), поскольку при этом векторы прямой и обратной последовательностей повертываются на  $90^\circ$  в противоположные направления (рис. 13-6). Очевидно, векторы прямой последовательности можно оставить без смещения, но векторы обратной последовательности сдвинуть на  $180^\circ$ . Отсюда вытекает простое и удобное для практики правило:

*при переходе через трансформатор с соединением  $Y/\Delta$  (или  $\Delta/Y$ ) достаточно только у векторов обратной последовательности изменить знак на противоположный.*

Нужно иметь в виду, что отказ от учета действительной группы соединения обмоток трансформатора приводит к несовпадению обозначений линейных проводов за трансформатором с маркировкой, отвечающей действительной группе соединений.

Следует особо подчеркнуть, что если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги, обусловленные соответствующей группой соединения обмоток трансформатора.

## Глава 14

# Однократная поперечная несимметрия

### 14.1 Общие замечания

Поперечная несимметрия в произвольной точке трехфазной системы в общем виде может быть представлена присоединением в этой точке неодинаковых сопротивлений, как это, например, показано на **рис. 14-1**. Такой подход, вообще говоря, позволяет получить решение в общем виде, из которого затем вытекают решения для всех частных случаев. Однако решение в общем виде приводит к весьма громоздким выражениям<sup>1</sup>. Поэтому значительно проще и нагляднее проводить решение для каждого вида поперечной несимметрии, используя характеризующие его граничные условия.

В настоящей главе рассмотрены три основных вида несимметричных коротких замыканий (двухфазное, однофазное и двухфазное на землю); при этом вначале предполагается, что эти замыкания металлические, а затем приведены указания, как учесть переходные сопротивления (дуга и пр.), которые могут быть в месте аварийного замыкания.

Приводимые выкладки, естественно, предполагают, что в соответствии с **§ 11-3** рассматриваются только основные гармоники тока и напряжения, причем схемы отдельных последовательностей состоят лишь из реактивностей и приведены к элементарному виду относительно короткого замыкания, т. е. найдены результирующая э. д. с. и результирующие реактивности  $X_{1\Sigma}$ ,  $X_{0\Sigma}$  и  $X_{2\Sigma}$ .

При записи граничных условий примем, что фаза А находится в условиях, отличных от условий для двух других фаз, т. е. она является, как говорят, *о с о б о й ф а з о й*. За положительное направление токов (фазных и их симметричных составляющих) будем считать направление к месту короткого замыкания. Наконец, чтобы упростить запись, будем опускать индекс вида короткого замыкания, сохраняя его только в записи граничных условий и в окончательных результатах выводов.

### 14.2 Двухфазное короткое замыкание

Запишем граничные условия для двухфазного короткого замыкания (**рис. 14-2,а**):

---

<sup>1</sup> Даже при отсутствии взаимоиндукции между  $Z_A$ ,  $Z_B$  и  $Z_C$

- 14.3 Однофазное короткое замыкание**
- 14.4 Двухфазное короткое замыкание на землю**
- 14.5 Учет переходного сопротивления в месте замыкания**
- 14.6 Правило эквивалентности прямой последовательности**
- 14.7 Комплексные схемы замещения**
- 14.8 Сравнение видов короткого замыкания**
- 14.9 Векторные диаграммы токов и напряжений**
- 14.10 Взаимное электромагнитное влияние синхронных машин при переходном процессе несимметричного короткого замыкания**
- 14.11 Применение практических методов к расчету переходного процесса при однократной поперечной несимметрии**

# **Глава 15**

## **Однократная продольная несимметрия**

**15.1 Общие замечания**

**15.2 Разрыв одной фазы**

**15.3 Разрыв двух фаз**

**15.4 Несимметрия от включения сопротивлений**

**15.5 Правило эквивалентности прямой последовательности**

**15.6 Комплексные схемы замещения**

**15.7 Распределение напряжений**

**15.8 Применение принципа наложения**





## **Часть IV**

### **Электромагнитные переходные процессы при особых условиях**



## **Глава 16**

### **Сложные виды повреждении**

**16.1 Общие замечания**

**16.2 Общий путь решения**

**16.3 Комплексные схемы**

**16.4 Двойные замыкания на землю**

**16.5 Однофазное короткое замыкание с разрывом фазы**



## **Глава 17**

### **Замыкания в распределительных сетях и системах электроснабжения**

**17.1 Общие замечания**

**17.2 Простое замыкание на землю**

**17.3 Учет изменения параметров проводников сети**

**17.4 Учет местных источников и нагрузок**

**17.5 Расчет токов короткого замыкания в установках на-  
пряжением до 1 000 в**



## **Глава 18**

### **Короткие замыкания в длинных линиях передачи переменного тока**

**18.1 Общие замечания**

**18.2 Расчет операторным методом**

**18.3 Упрощенное решение**

**18.4 Влияние несимметрии ротора**





## **Глава 19**

# **Влияние качаний синхронных машин на протекание электромагнитного переходного процесса**

**19.1 Общие замечания**

**19.2 Токи и напряжения при сдвиге векторов э. д. с. по фазе**

**19.3 Дифференциальное уравнение изменения переходной э. д. с. с учетом качаний синхронной машины**

**19.4 Приближенный учет качаний в расчетах коротких замыканий**



## ***Приложения***



# Литература

- [1] Ульянов С. А. *Электромагнитные переходные процессы в электрических системах*. Энергия.
- [2] Сулимова М. И. Зейлндзон Е. Д. Основные показатели эксплуатации релейной защиты и электроавтоматики в энергосистемах за 1962–1966 гг. (1).

