

Электромагнитные переходные процессы

Сергей Александрович Ульянов

1970

Оглавление

Предисловие	1
Введение	3
1 Основные сведения об электромагнитных переходных процессах	7
1.1 Основные определения	7
1.2 Причины возникновения и следствия	13
1.3 Назначения расчетов и требования к ним	14
2 Общие указания к выполнению расчетов	17
2.1 Основные допущения	17
2.2 Понятие о расчетных условиях	18
2.3 Система относительных единиц	19
2.4 Составление схемы замещения	24
2.5 Преобразование схем замещения	32
2.6 Применение принципа наложения	34
2.7 Мощность короткого замыкания	39
3 Переходный процесс в простейших трехфазных цепях	41
3.1 Постановка задачи и ее ограничения	41
3.2 Трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи	41
3.3 Действующие значения полных величин и их отдельных слагающих	47
3.4 Приближенное решение	49
3.5 Определение эквивалентной постоянной времени	50
Литература	53

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 построение 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. 13 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 пол-

ный, 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, шроф. 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 процессы¹, 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 источников² являются неизвестными переменными величинами.

Преподавание в вузах этого курса как самостоятельной специальной дисциплины³ 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. §1.3). 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-

¹В конце первой части рассматривается упрощенный учет качаний генераторов, что является естественным переходом ко второй части курса.

²За исключением тех, мощность которых практически может быть принята бесконечно большой.

³Точнее, 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.

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 сопротивления¹.

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 условиях². 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 считаться, тем более что оно иногда может быть решающим для окончательного суждения относительно возможности работы в условиях короткого замыкания. Само изучение

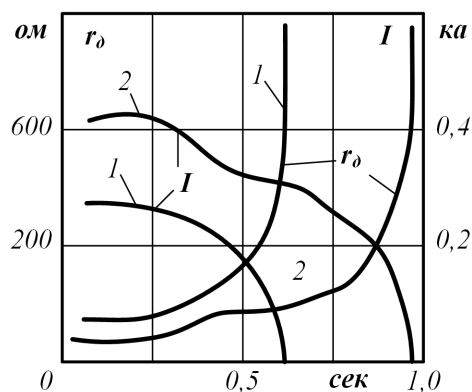


Рис. 1.1: Кривые изменения во времени тока и сопротивления самопогасающей открытой дуги на линии 110 кВ с деревянными опорами. 1, 2 — номера опытов.

¹Учет переходных сопротивлений и контактных соединений при выполнении расчетов коротких замыканий для установок напряжением до 1000 В имеет особое значение (§ 17-5).

²При наличии переходных сопротивлений симметрия сохраняется лишь при равенстве этих сопротивлений.

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.

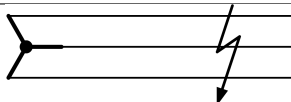
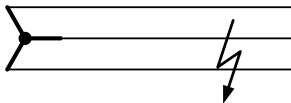
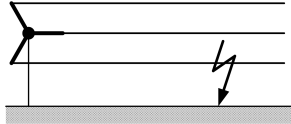
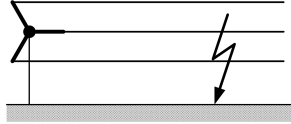
Виды короткого замыкания	Принципиальная схема	Буквенное обозначение на схемах места и вида короткого замыкания	Относительная вероятность короткого замыкания, %
Трехфазное		$K^{(3)}$	5
Двухфазное		$K^{(2)}$	10
Однофазное		$K^{(1)}$	65
Двухфазное на землю		$K^{(1,1)}$	20

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 возрастает³. 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.

Ф о р с и р о в к а 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).

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

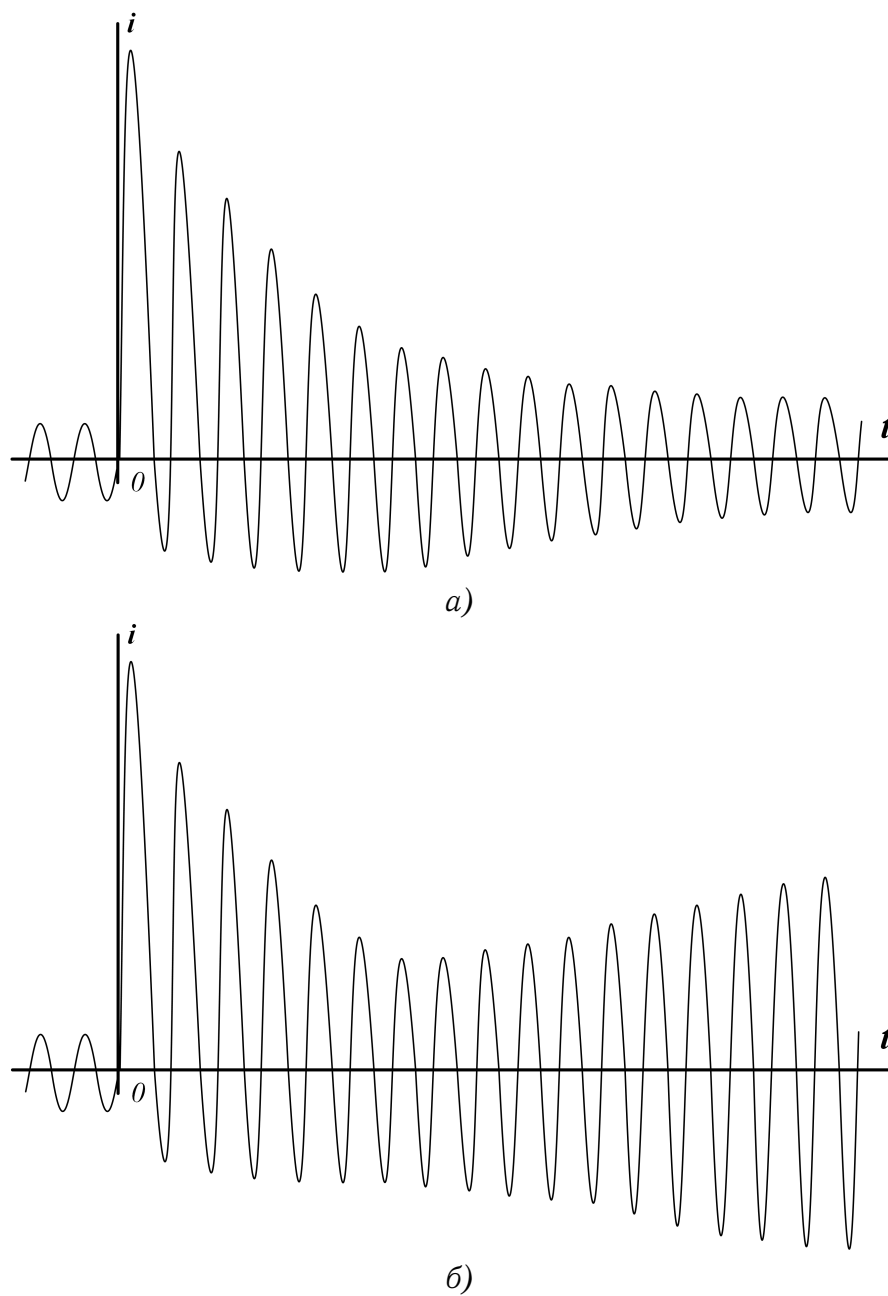


Рис. 1.2: Осциллограммы токов при внезапном коротком замыкании. *а* — при отсутствии автоматического регулирования возбуждения; *б* — при наличии такого регулирования.

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 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 §2.2.

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 устанавливаются 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:

$$E_{(б)}^* = E_{(н)}^* \frac{U_H}{U_б} \quad (2.11)$$

$$z_{(б)}^* = z_{(н)}^* \frac{I_б U_H}{I_H U_б} \quad (2.12)$$

или

$$z_{(б)}^* = z_{(н)}^* \frac{S_б U_H^2}{S_H U_б^2} \quad (2.13)$$

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 $S_б$, 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 $U_б$ рекомендуется принимать S_H или близкое к нему. При $U_б = U_H$ пересчет относительных э. д. с. вообще отпадает ($E_{(б)}^* = E_{(н)}^*$), а выражения для пересчета относительных сопротивлений принимают более простой вид:

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

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

Равенство $U_б = U_H$ вообще говоря, соблюдается только для части элементов, так как напряжения U_H 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_H всех элементов одной ступени напряжения одинаковыми и равными некоторому среднему номинальному напряжению $U_{ср}$ для этой цепи. (см. §2.4). 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 2-1. 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, $\cos \varphi = 0,9$, $\eta = 96\%$, $I_{пуск} = 5,6$, $M_{пуск} = 0,9$. 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.

$$U_б = 6 \text{ кВ}, \quad S_б = \frac{2500}{0,9 \cdot 0,96} = 2900 \text{ кВа}$$

и соответственно

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

Относительная реактивность двигателя при пуске составляет

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

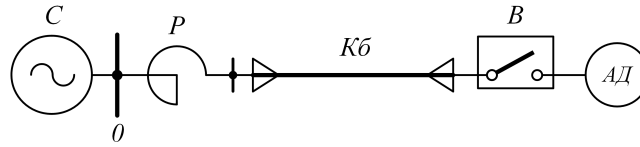


Рис. 2.1: Схема к примеру 2-1.

Относительные базисные реактивности реактора и кабеля будут:

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

и

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

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 ω_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 ω_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. §2.1) 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 §2.3. Так, сопротивление элемента, для которого известно его $z_{(H)}$, на основании (2.8a) или (2.9a) будет:

$$z = z_{(H)}^* \frac{U_H}{\sqrt{3}I_H}, \text{ ом} \quad (2.22)$$

или

$$z = z_{(H)}^* \frac{U_H^2}{S_H}, \text{ ом} \quad (2.23)$$

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 именно¹:

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 элементов², 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)³ 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 α — относительное отклонение указанного напряжения или коэффициента трансформации от их номинальных значений.

В соответствии с принятым допущением (см. §2.3) при изменении числа витков регулируемой обмотки индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора в делом, приведенное к стороне

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

² Кроме реакторов, о чем указывалось в §2.3.

³ 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} .

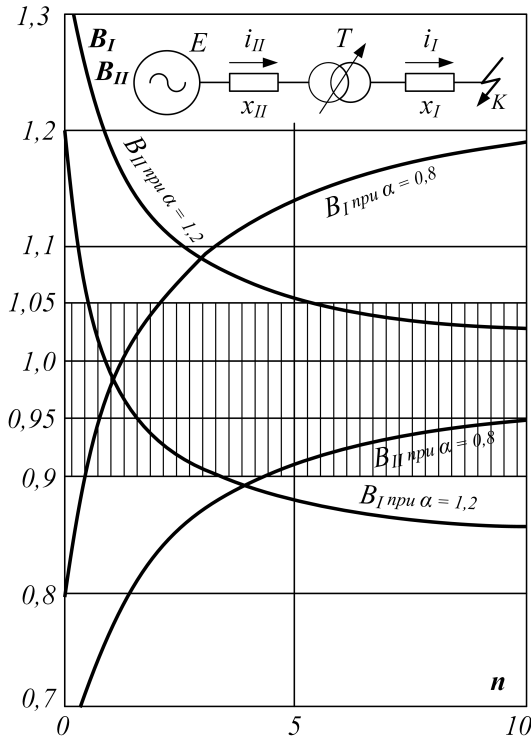


Рис. 2.2: Кривые изменения отношений B_I и B_{II} в функциях n .

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 α погрешность приближенного решения может выходить достаточно далеко за пределы допустимой зоны. При заданном значении α величины отношений B_I и B_{II} при изменении n от 0 до ∞ 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 $k' = U_I / \beta U_{II} = k / \beta$. 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 α 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 $n = \frac{k^2 x_{II}}{x_I} = \frac{\dot{x}_{II}}{\dot{x}_I} = \frac{x_{II}}{x_I}$ — 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

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

где

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

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

или, иначе,

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

— 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 напряжения⁴.

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 2-2. 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 элементов⁵ будут:

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

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

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

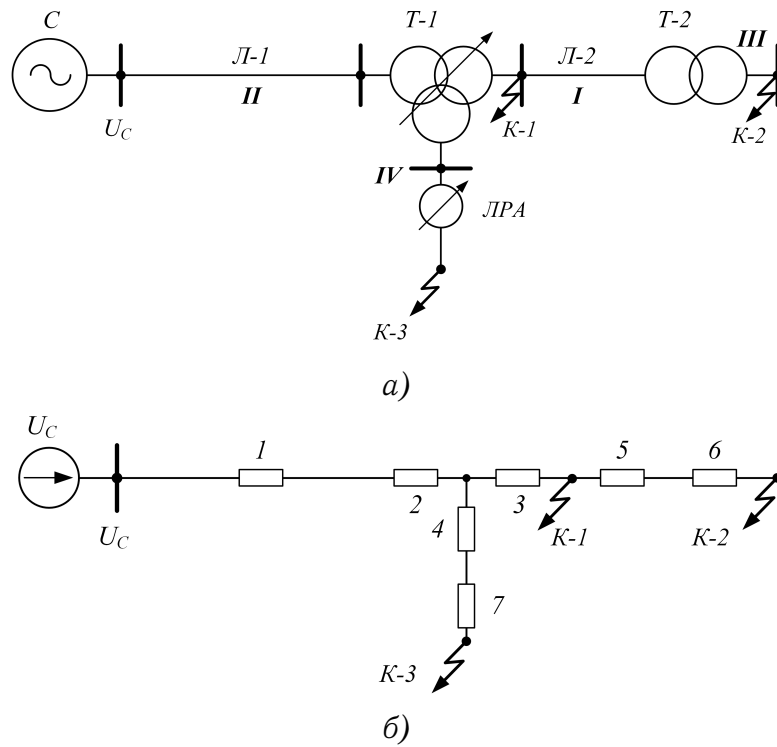


Рис. 2.3: К примеру 2-2. а — исходная схема; б — схема замещения.

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.

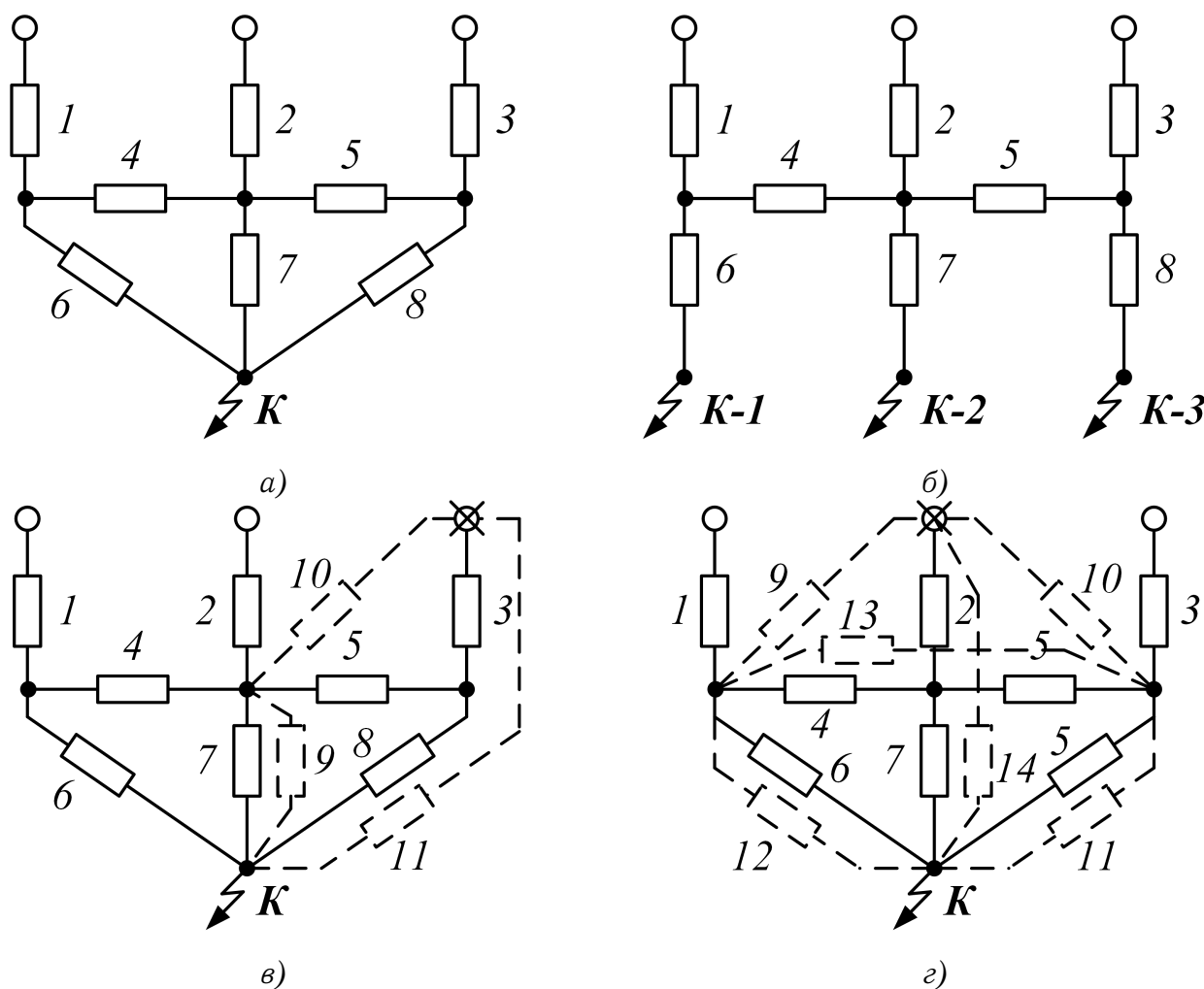


Рис. 2.4: Пример преобразования схемы: *а* — исходная схема; *б* — после рассечения в узле короткого замыкания; *в* и *г* — этапы преобразования схемы.

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 $+U_{к0}$. 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 $-U_{к0}$. 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 незначительны⁶.

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).

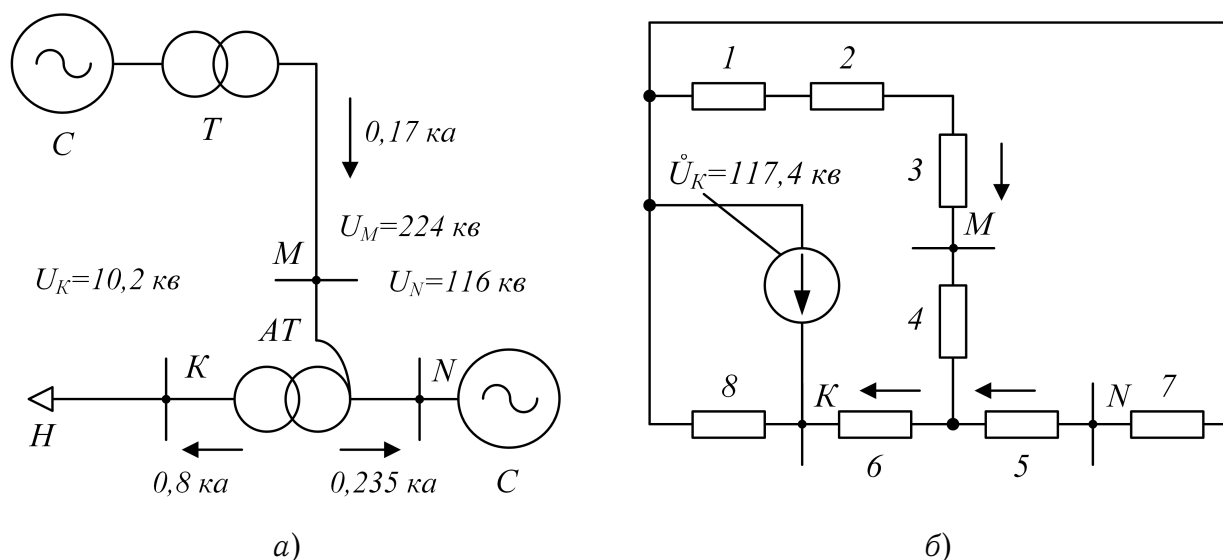


Рис. 2.5: К примеру 2-2

Пример 2-3. 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 слагающую 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.

⁶Это 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:

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

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 источника⁷ в питании короткого замыкания. Далее, если результирующее сопротивление схемы относительно места короткого замыкания Z_Σ , то, очевидно, можно записать равенства:

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

⁷Как 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 2-4. 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.

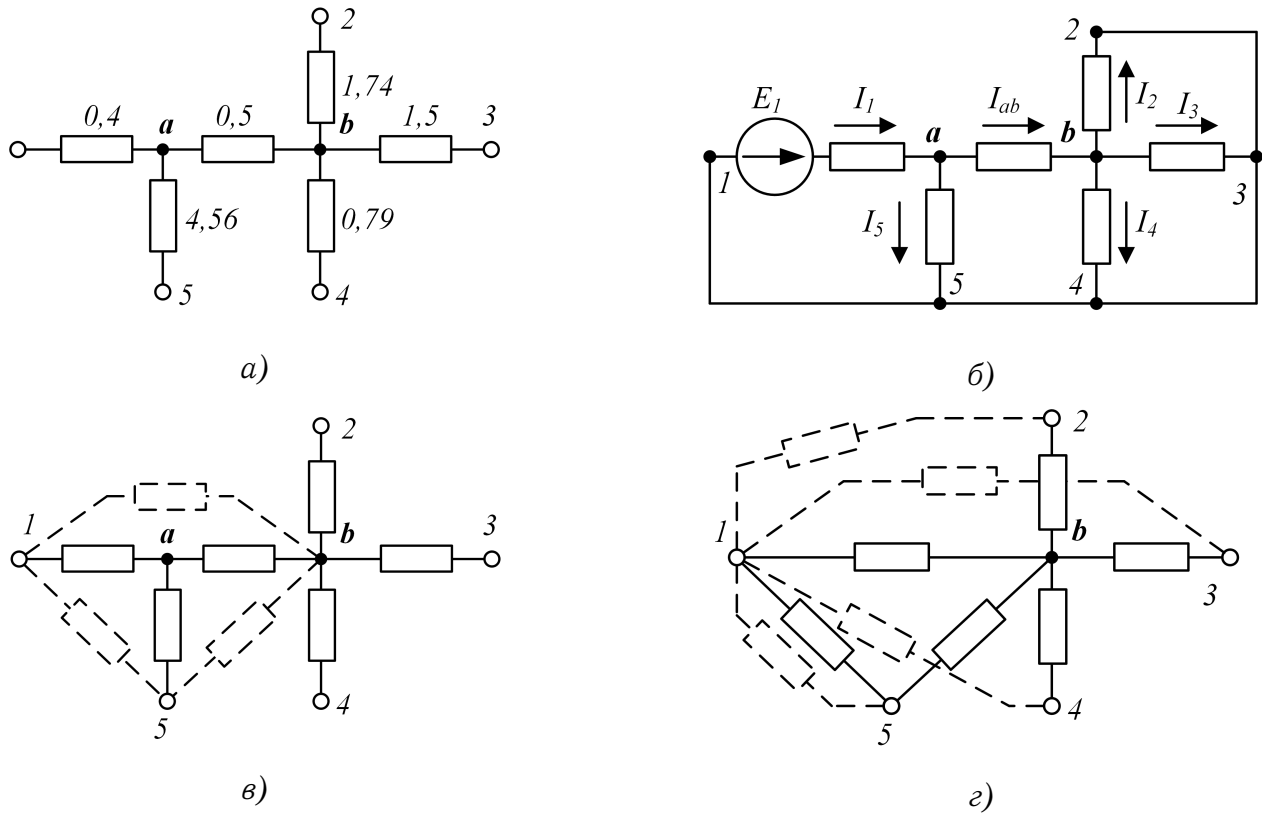


Рис. 2.6: К примеру 2-4: *а* — исходная схема; *б* — к применению способа токораспределения; *в* и *г* — этапы преобразования схемы.

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:

$$S_{от.н} = \sqrt{3}U_n I_{от.н}.$$

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

$$S_{кт} = \sqrt{3}U_n I_{кт}, \quad (2.38)$$

где $I_{кт}$ — ток короткого замыкания в момент t размыкания контактов выключателя; U_n — 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:

$$S_{к(б)} = I_{к(б)}, \quad (2.39)$$

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.

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 амплитуду¹. 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

¹Применение чувствительного и быстродействующего автоматического регулирования возбуждения генераторов дополнительно способствует принятию указанного предположения.

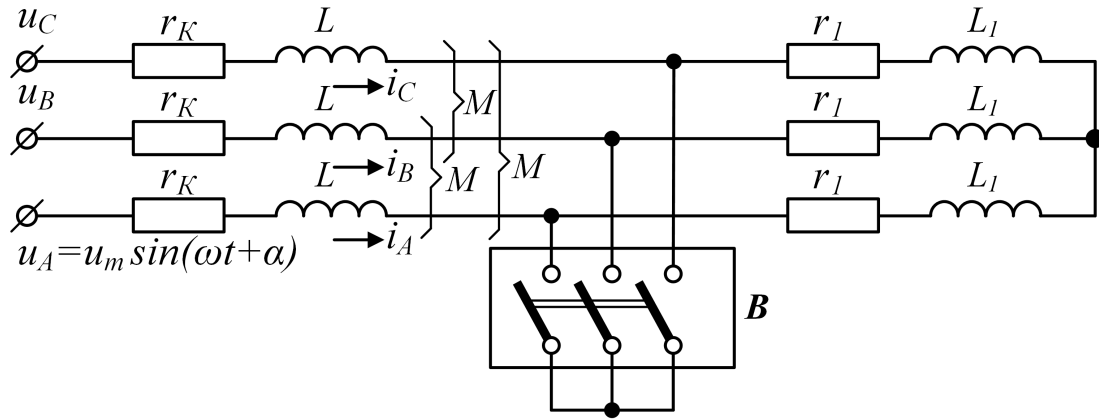


Рис. 3.1: Простейшая трехфазная электрическая цепь.

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 α (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.

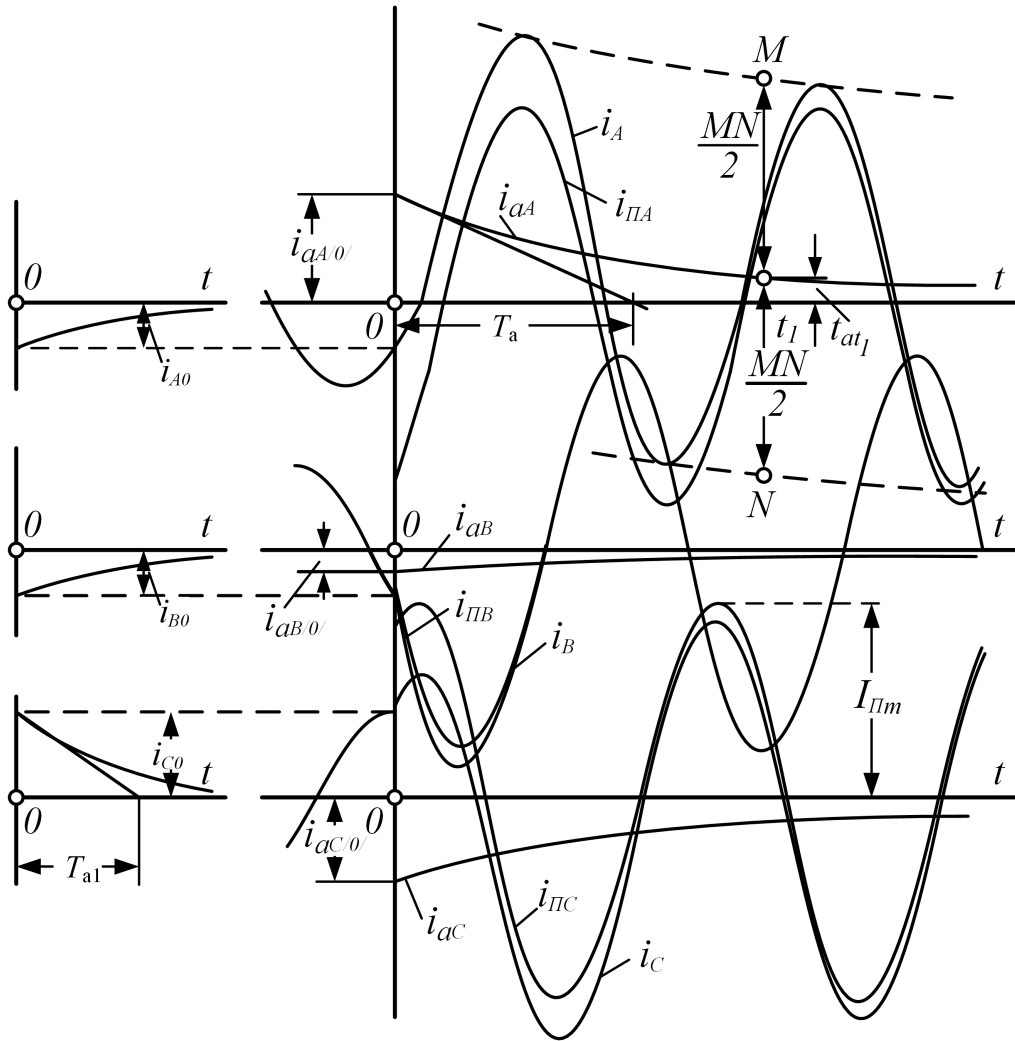


Рис. 3.3: Осциллограммы токов в фазах при внезапном трехфазном коротком замыкании в простейшей электрической цепи.

Напомним, что подкасательная в любой точке экспоненты² 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 $I_{ПА}$, $I_{ПВ}$, $I_{ПC}$ (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

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

²Обычно 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.

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;

φ_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 $I_{\Pi m} = U_m/z_K$. Соответственно второй член представляет, как и раньше, затухающий по экспоненте ток, его называют также аperiodической слагающей тока. Начальное значение этой слагающей определяется из начальных условий, т. е.

$$i_0 = i_{\Pi} / 0 + i_a / 0, \quad (3.4)$$

откуда после подстановки соответствующих выражений имеем:

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

Поскольку токи i_{Π} , i_0 являются проекциями векторов $\dot{I}_{\Pi m}$ и \dot{I}_m на линию времени, то ток $i_{a|0|}$ также можно рассматривать как проекцию вектора $(\dot{I}_m - \dot{I}_{\Pi m})$ на ту же линию (рис. 3.2). В зависимости от фазы включения α начальное значение тока $i_{a|0|}$ может изменяться от возможной наибольшей величины, когда вектор $(\dot{I}_m - \dot{I}_{\Pi m})$ 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 $i_{a|0|}$ 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 расчетный³.

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

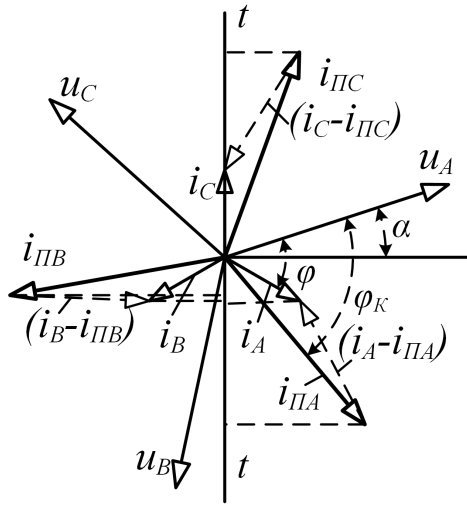


Рис. 3.2: Векторная диаграмма для начального момента трехфазного короткого замыкания. свободный ток; его называют также аperiodической слагающей тока. Начальное значение этой слагающей определяется из начальных условий, т. е.

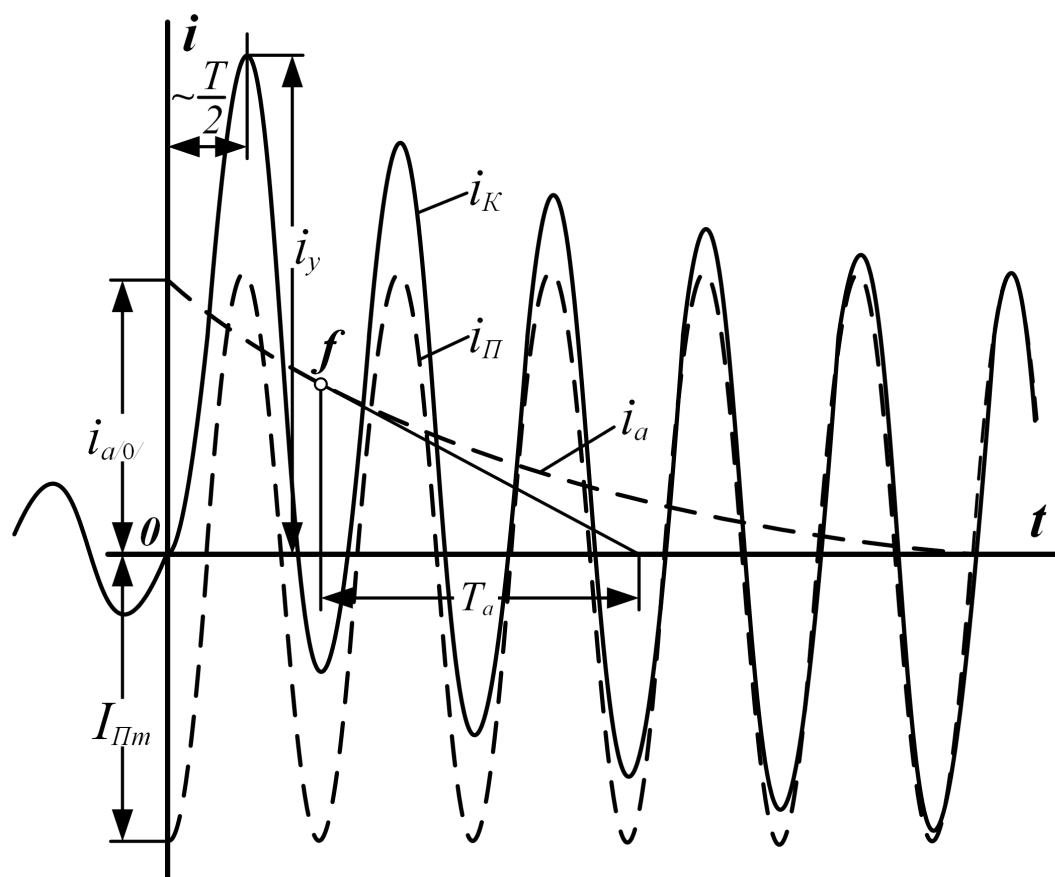


Рис. 3.4: Осциллограмма тока короткого замыкания при наибольшей апериодической составляющей.

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 α 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 §3.2 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.

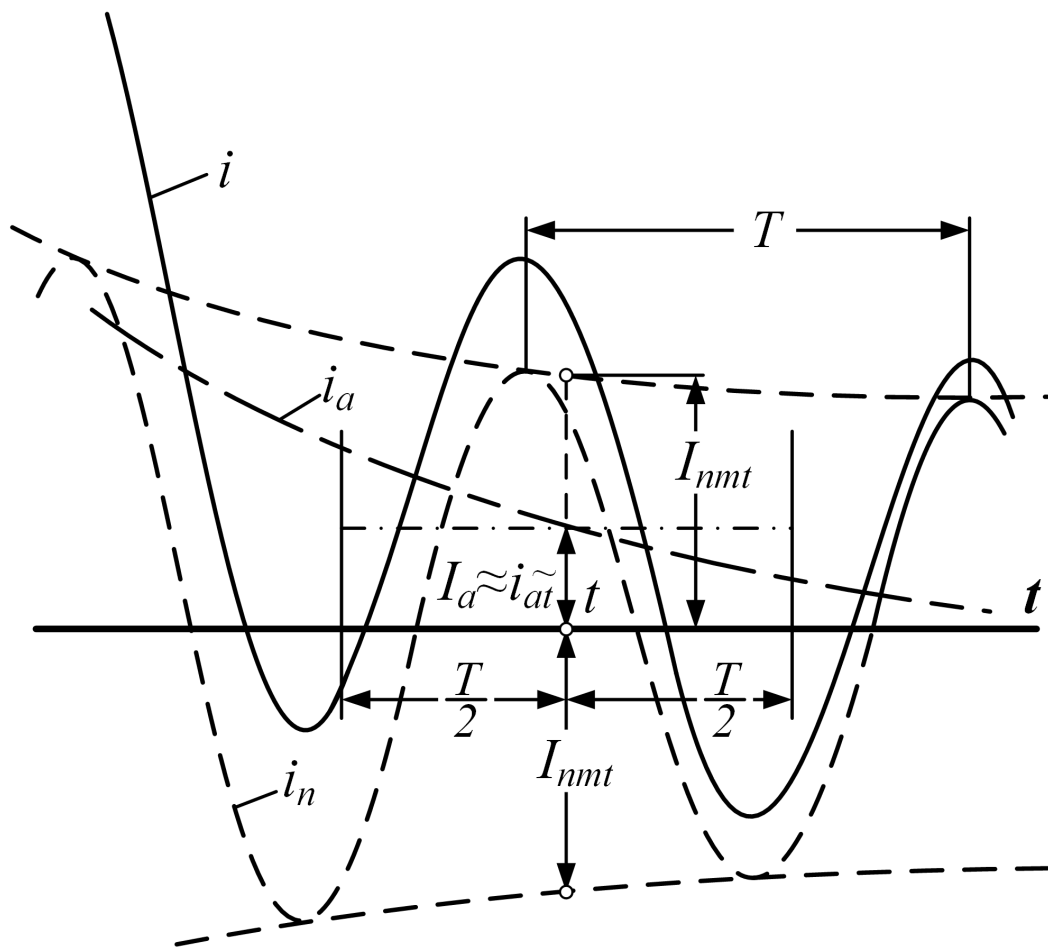


Рис. 3.5: К определению действующего значения тока в переходном процессе.

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

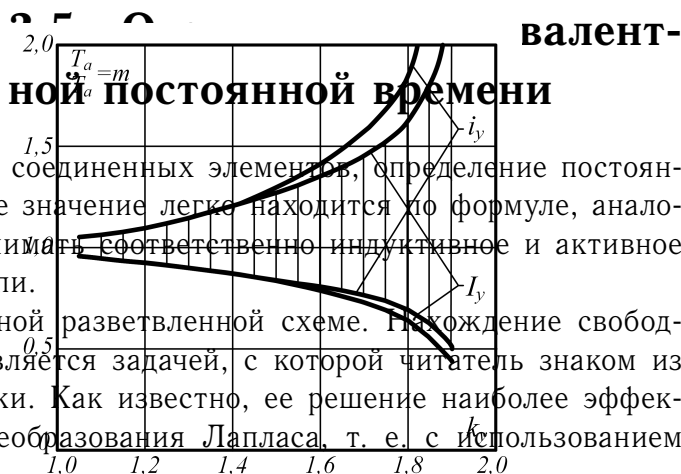
$$c \leq \sqrt{1,05^2 - 1} \approx 1/3,$$

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 §2.1.

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 времени, 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_{Σ} — суммарное индуктивное сопротивление схемы, найденное при отсутствии всех активных сопротивлений ($r = 0$), и r_{Σ} — суммарное активное сопротивление схемы при отсутствии всех индуктивных сопротивлений ($x_{\Sigma} = 0$). Такой искусственный прием определения $T_{a.э}$ сильно упрощает решение⁴. При нем приблизительно

⁴Отметим, 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 $T_a = 0,045 \text{ сек}$, которое считают одним и тем же для всех ветвей схемы.

Пример 3-1. 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 $T_{*al} = \frac{-1}{-0,091} = 11$;

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).

