

Электромагнитные переходные процессы

Сергей Александрович Ульянов

1970

Оглавление

1	Основные сведения об электромагнитных переходных процессах	1
1.1	Основные определения	1
1.2	Причины возникновения и следствия	6
1.3	Назначения расчетов и требования к ним	8
2	Общие указания к выполнению расчетов	11
2.1	Основные допущения	11

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

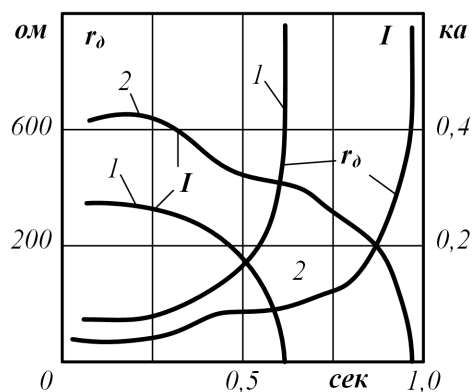


Рис. 1.1: Кривые изменения во времени тока и сопротивления самопогасающей открытой дуги на линии 110 кВ с деревянными опорами. 1, 2 – номера опытов.

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.

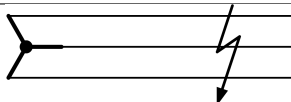
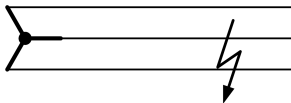
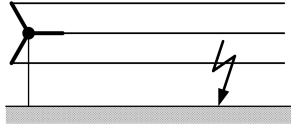
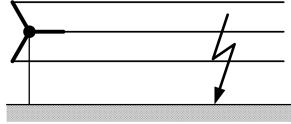
Виды короткого замыкания	Принципиальная схема	Буквенное обозначение на схемах места и вида короткого замыкания	Относительная вероятность короткого замыкания, %
Трехфазное		$K^{(3)}$	5
Двухфазное		$K^{(2)}$	10
Однофазное		$K^{(1)}$	65
Двухфазное на землю		$K^{(1,1)}$	20

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 последующим 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. 1.3, представляющие показатели работы устройств автоматического повторного включения по всем союзным энергосистемам за пятилетие 1962–1966 гг.

[Л. 14].

Наглядной
иллю-
страцией
эффек-
тивности
автома-
тического
повторного
включения
служат
данные
табл. 1.3,
представ-
ляющие
показатели
работы
устройств
автома-
тического
повторного
включения
по всем
союзным
энергоси-
стемам за
пятилетие
1962—1966 гг.

[Л. 14].

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,

Место установки АПВ	Трехфазное АПВ				Однофазное АПВ	
	Однократного действия		Многократного действия		од-	
	успешно	неуспешно	успешно	неуспешно	успешно	неуспешно
Воздушные линии 2–10 кВ	53.5	46.5	56.2	43.8	73.2	26.8
То же 20–35 кВ	69.5	30.5	78.1	21.9	80.7	19.3
110–154 кВ	75.0	25.0	80.5	19.5	59.5	40.5
220–330 кВ	76.5	23.5	77.2	22.8	—	—
400–500 кВ	67.0	33.0	—	—	—	—
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)

Место установки АПВ	Трехфазное АПВ				Однофазное АПВ	
	5		5		однократного дей-	
	успешно	неуспешно	успешно	неуспешно	успешно	неуспешно
1	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
2	56.2	43.8	68.3	31.7	—	—
1	45.3	54.7	43.0	57.0	—	—
Шины	64.8	25.2	—	—	—	—
Трансформаторы	60.0	40.0	—	—	—	—
3	58,2	41,8	69,2	30,8	73,0	27,0

Таблица 1.3: Показатели работы автоматического повторного включения по всем энергосистемам Союза за 1962–1966 гг. (в процентах)

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.

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

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

Для иллюстрации процесса короткого замыкания на рис. 1-2 приведены типичные осциллограммы тока короткого замыкания при отсутствии автоматического регулирования возбуждения (рис. 1-2,а) и при наличии его (рис. 1-2,б). В начальной стадии обе осциллограммы практически одинаковы. Это объясняется тем, что здесь их характер определяется главным образом затуханием возникших свободных токов, а нарастание тока возбуждения от действия АРВ благодаря магнитной инерции еще очень мало. В дальнейшем, как видно, при отсутствии АРВ кривая постепенно переходит в синусоиду нового установившегося режима. При наличии АРВ амплитуда кривой тока, достигнув некоторого наименьшего значения, вновь возрастает, стремясь к установившемуся значению, которое, естественно, больше, чем при отсутствии АРВ. Возрастающий характер кривой тока при наличии АРВ обычно получается при заметной удаленности короткого замыкания относительно генератора.

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

1.2 Причины возникновения и следствия

Основной причиной возникновения рассматриваемых в дальнейшем электромагнитных переходных процессов являются преимущественно короткие замыкания. Последние в свою

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

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 может 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 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 **плохо отсканирован**;
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).