

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	7
1.3	Назначения расчетов и требования к ним	8
2	Общие указания к выполнению расчетов	11
2.1	Основные допущения	11
2.2	Понятие о расчетных условиях	12
2.3	Система относительных единиц	13
2.4	Составление схемы замещения	18
2.5	Мощность короткого замыкания	20

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.

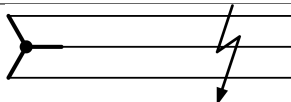
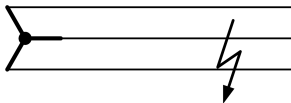
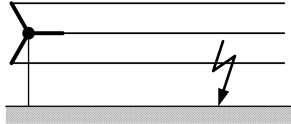
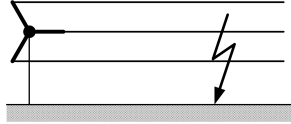
Виды короткого замыкания	Принципиальная схема	Буквенное обозначение на схемах места и вида короткого замыкания	Относительная вероятность короткого замыкания, %
Трехфазное		$K^{(3)}$	5
Двухфазное		$K^{(2)}$	10
Однофазное		$K^{(1)}$	65
Двухфазное на землю		$K^{(1,1)}$	20

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

[Л. 14].

Место установки АПВ	Трехфазное АПВ				Однофазное АПВ	
	однократного действия		многократного действия		однократного действия	
	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 1.2: 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.

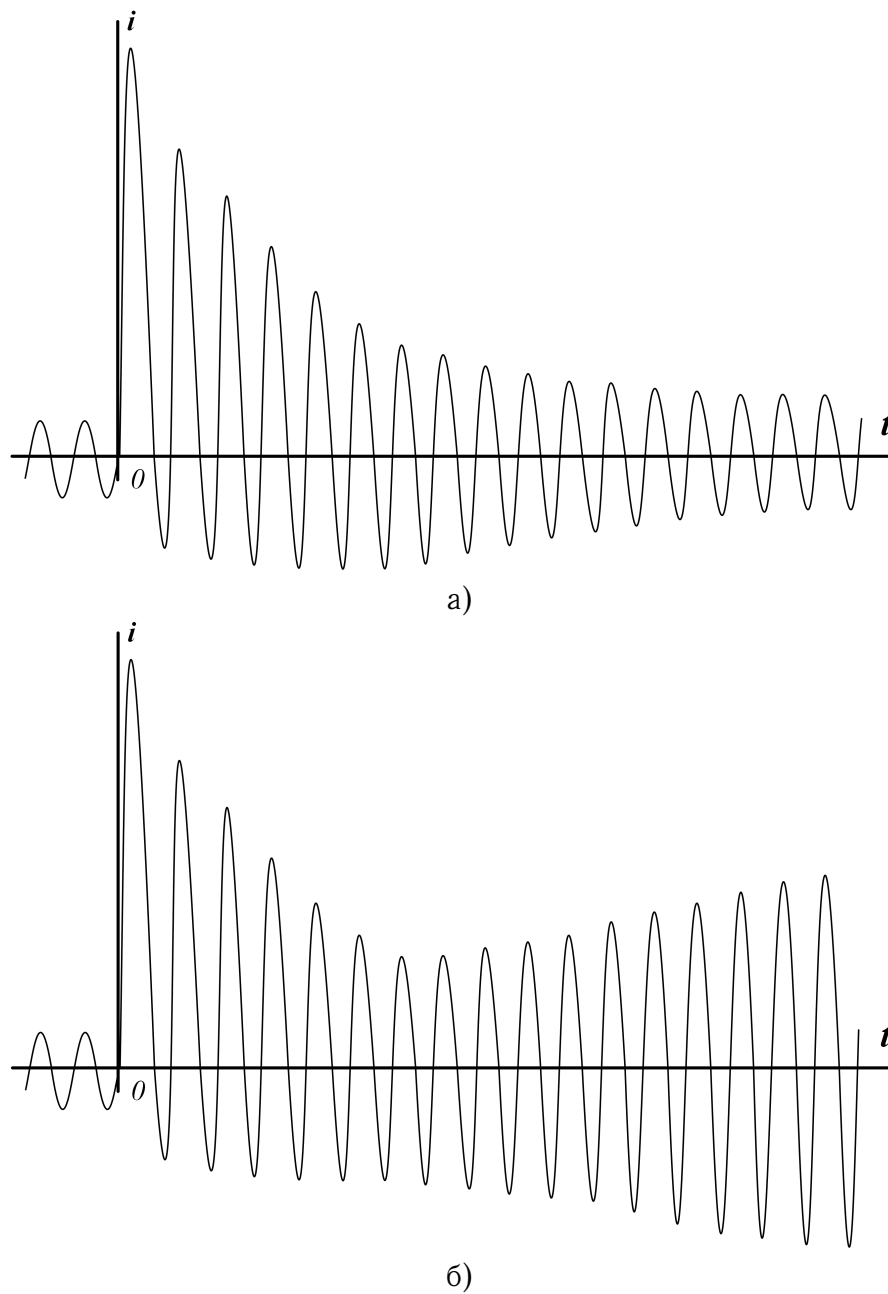


Рис. 1.2: Осциллограммы токов при внезапном коротком замыкании. а — при отсутствии автоматического регулирования возбуждения; б — при наличии такого регулирования.

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 упрощенных 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

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

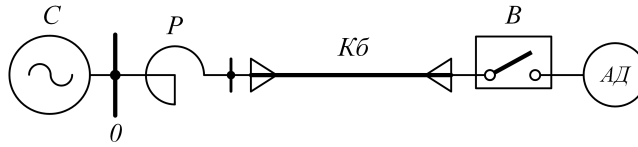


Рис. 2.1: Схема к примеру 2-1.

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 соотношений, 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 $z_{(н)*}$, на основании (2.8a) или (2.9a) будет:

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

или

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

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:

$$\mathbf{515; 340; 230; 154; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15 \text{ кВ}}$$

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 ступени.

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), вольтдобавочные 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 K .

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 $k' =$

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 $\pm 16\%$.

αk , 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 целом, приведенное к стороне его нерегулируемой обмотки, остается постоянным. Поэтому в данном случае можно сказать, что оно включено в x_{II} .

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

2.5 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

$$S_{kt} = \sqrt{3} U_n I_{kt}, \quad (2.31)$$

где I_{kt} — 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:

$$S_{*(б)} = I_{*(б)}, \quad (2.32)$$

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.